

Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин

В двух книгах

Книга 2

Под редакцией

В.Г.Огонькова, С.В.Серебрянникова



Москва
Издательский дом МЭИ
2012

УДК 621.315.61:621.313.33
ББК 30.37:31.261
Э 455

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент кафедры физики электротехнических
материалов, компонентов и автоматизированных
электротехнологических комплексов НИУ МЭИ
А.П. Черкасов

Авторы:

В.Г. Огоньков,
канд. техн. наук, лауреат Государственной премии СССР,
лауреат премии Совета Министров РФ;
С.В. Серебрянников,
докт. техн. наук; лауреат премии Правительства РФ;
В.Г. Сяков,
канд. техн. наук, лауреат Государственной премии СССР;
С.А. Яценко,
канд. техн. наук

Электроизоляционные материалы и системы изоляции для
Э 455 электрических машин. В двух книгах. Кн. 2 / В.Г. Огоньков и др.;
под ред. В.Г. Огонькова, С.В. Серебрянникова. — М.: Изда-
тельский дом МЭИ, 2012. — 304 с.: ил.

ISBN 978-5-383-00751-8 (Кн. 2)

ISBN 978-5-383-00750-1

Приведены результаты разработки отечественных терморезистивных
видов изоляции для электротехнического оборудования. Подробно опи-
сана широко применяемая изоляция, изготавливаемая методом вакуум-
нагнетательной пропитки. Рассмотрены результаты испытаний: различ-
ных обмоток, влияния технологических операций, данные по эксплуата-
ции электрических машин с новыми типами изоляции. Показано основ-
ное технологическое оборудование для изготовления изоляции обмоток.

Для широкого круга специалистов электромашиностроительной
отрасли, конструкторов и технологов, студентов и аспирантов вузов.

УДК 621.315.61:621.313.33
ББК 30.37:31.261

ISBN 978-5-383-00750-1

ISBN 978-5-383-00751-8 (Кн. 2)

©Огоньков В.Г., Серебрянников С.В.,
Сяков В.Г., Яценко С.А., 2012
© ЗАО «Издательский дом МЭИ», 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Введение	7
Глава первая. КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	8
1.1. Провода, применяемые для обмоток	8
1.2. Технология изготовления обмоток	11
1.3. Снижение напряженности электрического поля на выходе обмотки из паза.....	20
Глава вторая. ТЕРМОРЕАКТИВНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	30
2.1. Технические требования, предъявляемые к изоляции современных электрических машин	30
2.2. Термореактивная изоляция и электроизоляционные материалы.....	33
2.3. Отечественные виды термореактивных систем изоляции и материалы	43
Глава третья. МИКАЛЕНТНАЯ КОМПАУНДИРОВАННАЯ ИЗОЛЯЦИЯ	48
3.1. Технология изготовления обмоток с микалентной компаундированной изоляцией .	48
3.2. Опыт эксплуатации статоров с микалентной компаундированной изоляцией статорных обмоток.....	51
Глава четвертая. ИЗОЛЯЦИЯ, ИЗГОТОВЛЯЕМАЯ МЕТОДОМ ВАКУУМ-НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ ПРОПИТКИ	54
4.1. Изоляция «Монолит»	54
4.2. Изоляция «Монолит-2».....	65
4.2.1. Основные принципы изготовления изоляции «Монолит-2».....	65
4.2.2. Влияние ускорителей, вводимых в стеклослюдинитовую ленту, на жизнеспособность эпоксидного компаунда при вакуум-нагнетательной пропитке.....	99
4.2.3. Пропитка изоляции из стеклослюдинитовых лент	102
4.2.4. Термообработка изоляции перед пропиткой.....	113
4.2.5. Вакуумирование обмотки и пропиточного компаунда, пропитка	119
4.2.6. Отверждение изоляции после пропитки	122
4.2.7. Технология изготовления и технологическое оборудование для изоляции «Монолит-2»	126
4.2.8. Свойства изоляции «Монолит-2».....	143
4.3. Изоляция «Монолит-3»	165
4.4. Изоляция «Монолит-4».....	168
4.4.1. Технология изготовления изоляции «Монолит-4»	168
4.4.2. Характеристики статорной обмотки с изоляцией «Монолит-4»	195
4.4.3. Использование изоляции «Монолит-4» в конструкции статорной обмотки	199
Глава пятая. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СВОЙСТВА ИЗОЛЯЦИИ «МОНОЛИТ-5»	204
Глава шестая. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ «МОНОЛИТ-2» В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ	212
Глава седьмая. ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ОБМОТОК С ИЗОЛЯЦИЕЙ «МОНОЛИТ-2»	230
Глава восьмая. ИЗОЛЯЦИЯ, ИЗГОТОВЛЯЕМАЯ ИЗ ПРОПИТАННЫХ ЛЕНТ	233
8.1. Изоляция типа ВЭС на основе насыщенной связующим (пропитанной) стеклослюдинитовой ленты для турбо- и гидрогенераторов	233
8.2. Изоляция типа «Слюдотерм» на основе стеклослюдинитовой ленты ЛТСС-3 для турбогенераторов	239
8.3. Изоляция типа «Монотерм»	243
8.4. Изоляция типа «Термолит»	247
Список литературы	295

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие крупного электромашиностроения потребовало от создателей электрических машин воплощения повышенных требований как к самому оборудованию, так и к отдельным узлам этого оборудования. Одними из важнейших компонентов являются электроизоляционные материалы и системы изоляции. Так как они по существу определяют эксплуатационную надежность электрооборудования. Поэтому разработкам новых материалов, технологиям их переработки в системе изоляции уделяется много внимания. В книге приводится обзор различных видов термореактивной изоляции, пришедшей на смену микалентной компаундированной изоляции. Показано что наиболее широко применяемая термореактивная изоляция — это изоляция, изготавливаемая методом вакуум-нагнетательной пропитки. Поэтому этот тип изоляции наиболее подробно освещен в книге. Описаны основные принципы изготовления изоляции, приведены результаты исследований как самой изоляции, так и влияние технологических операций на качество изоляции.

Подробно рассмотрены результаты влияния систем изоляции на конструкцию электрических машин. Приведены результаты усовершенствования систем изоляции, области применения современных систем изоляции и данные эксплуатации электрических машин с термореактивной изоляцией.

Книга представляет интерес для конструкторов, технологов, создателей электрических машин, а так же студентов электротехнических специальностей.

Авторы

*Всем электротехникам —
разработчикам
и исследователям
электрической изоляции
посвящается*

ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в области электротехнического оборудования, в том числе и электрических машин, обусловлен повышением качественного уровня электротехнических материалов, в частности электроизоляционных материалов, которые по сравнению с магнитными и проводниковыми имеют наибольшие резервы совершенствования.

Эффективность новых электроизоляционных материалов реализуется главным образом через системы изоляции электрооборудования, которые в значительной мере определяют эксплуатационные, энергетические характеристики, долговечность и надежность электрических машин и аппаратов.

Повышение уровня свойств систем изоляции и нагревостойкости позволяет увеличить электрические, механические и тепловые нагрузки на изоляцию, т.е. улучшить удельные характеристики электрических машин или увеличить срок их службы. Важную роль при разработке новых турбогенераторов, гидрогенераторов и высокого напряжения электродвигателей сыграла изоляция на основе стеклослюдосодержащих лент и терморезистивных связующих. Замена mica-лентой компаундированной изоляции терморезистивной позволила улучшить электрические и механические характеристики изоляции и тем самым уменьшить ее толщину или повысить в тех же габаритах мощность и рабочую температуру электрооборудования. Рост единичных мощностей генераторов и двигателей ужесточил требования не только к изоляции обмоток, но и к материалам и способам крепления обмоток.

В настоящее время определились два основных направления технологии изготовления изоляции. Первое — изоляция, изготавливаемая из пропитанных лент с последующей опрессовкой и термообработкой в пресс-форме или гидростатической опрессовкой битумом в котле (изоляция типа слюдотерм, ВЭС). Второе — изоляция, выполняемая из сухих слюдосодержащих лент с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой эпоксидным компаундом (изоляция типа монолит).

Наиболее широкое применение как в отечественной, так и в зарубежной электротехнической промышленности нашел метод вакуум-нагнетательной пропитки изоляции.

Глава первая

КОНСТРУКЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1.1. Провода, применяемые для обмоток

Для стержневых обмоток турбо- и гидрогенераторов, электрических двигателей высокого напряжения применяют следующие медные провода прямоугольного сечения со стекловолокнуистой изоляцией:

- ПСДКТ, ПСДКТ-Л, ПСД-Л, ПСДК-Л (ТУ 16.К71-129). Токопроводящая жила изготовлена из медной проволоки прямоугольного сечения. На жилу двумя слоями наложена изоляция из стеклянных нитей, пропитанных электроизоляционными лаками;
- ПСД-1 (ГОСТ 22301). Токопроводящая жила изготовлена из медной проволоки прямоугольного сечения. На жилу слоями наложена изоляция из стеклянных нитей, пропитанных термореактивным эпоксидно-полиэфирным лаком;
- ПСД-934 (ТУ 3592-094-59575813). Токопроводящая жила изготовлена из медной проволоки прямоугольного сечения. На жилу двумя слоями наложена изоляция из стеклянных нитей, пропитанных термореактивным лаком;
- ПСДП-934-П (ТУ 3592-094-59575813). Токопроводящая жила изготовлена из медной трубы прямоугольного сечения. На жилу двумя слоями наложена изоляция из стеклянных нитей, пропитанных термореактивным лаком.

В табл. 1.1 приведены основные характеристики этих проводов.

Для катушечных обмоток применяют провода с эмалево-волокнуистой изоляцией:

- ПЭТСД, ПЭТВСД, ПЭТВСДТ (ТУ 16.К71-020). Токопроводящая жила изготовлена из медной проволоки прямоугольного сечения. Жила изолирована теплостойкой эмалью и двумя слоями обмотки стеклянных нитей и пропитана электроизоляционным лаком;
- ПЭТСЛО-1, ПЭТСЛО-2, ПЭТСО-1, ПЭТСО-2 (ТУ 3592-096-59575813). Токопроводящая жила изготовлена из медной проволоки прямоугольного сечения. Жила изолирована теплостойкой эмалью и одним слоем обмотки из стеклянных нитей, пропитанных термореактивным связующим.

Основные характеристики этих проводов приведены в табл. 1.2.

В настоящее время для катушечной изоляции электрических машин на напряжение 6 и 10 кВ применяют следующие провода со слюдосодержащей лентой:

- ППС, ППС-2 — провода с медной жилой и слюдосодержащей лентой;
- ППЛС — медная жила провода, покрытая полиэтилентерефталатной пленкой и слюдосодержащей лентой;
- ППСС, ППСС-1 — медная жила имеет изоляцию из пленкослюдяной ленты.

1.1. Провода, применяемые для обмоток

Таблица 1.1

Основные характеристики медных проводов прямоугольного сечения со стекловолокнуистой изоляцией

Марка провода	Класс нагревостойкости	Номинальные размеры проволоки (по сторонам), мм	Номинальная толщина изоляции (удвоенная по сторонам), мм	Напряжение проводов, В, не менее (после испытания на эластичность)	Прочность изоляции к механическим воздействиям, число двойных ходов иглы, не менее	Относительное удлинение, %, не менее
ПСДТ	F (155 °C)	«a» 0,90—5,60; «b» 2,12—12,50	«A—a» 0,28—0,45; «B—b» 0,28—0,38	400—550	300	30—34
ПСД-1	F (155 °C)	«a» 0,90—5,60; «b» 2,12—12,50	«A—a» 0,31—0,47; «B—b» 0,27—0,40	550—650	500	30
ПСД-Л	F (155 °C)	«a» 0,90—5,60; «b» 2,12—12,50	«A—a» 0,33—0,45; «B—b» 0,29—0,42	450—600	270	30—34
ПСДК-Л	200 °C	«a» 0,90—5,60; «b» 2,12—12,50	«A—a» 0,33—0,45; «B—b» 0,29—0,42	450—600	270	30—34
ПСД-934	F (155 °C)	«a» 0,90—5,60; «b» 2,12—12,50	«A—a» 0,24—0,35; «B—b» 0,24—0,31	600	250	35
ПСДП-934-П	F (155 °C)	«a» 4,00—6,00; «b» 5,00—12,50	«A—a» 0,31—0,35; «B—b» 0,24—0,31	600	250	35

Таблица 1.2

Основные характеристики медных проводов с эмалево-стекловолокнуистой изоляцией

Марка провода	Класс нагревостойкости	Номинальные размеры проволоки (по сторонам), мм	Номинальная толщина изоляции (удвоенная по сторонам), мм	Напряжение проводов, В, не менее (после испытания на эластичность)	Прочность изоляции к механическим воздействиям, число двойных ходов иглы, не менее	Относительное удлинение, %, не менее
ПЭТСД; ПЭТВСД	H (180 °C); F (155 °C)	«a» 0,80—3,55; «b» 2,00—10,00	«A—a» 0,45—0,56; «B—b» 0,41—0,47	900	500	30—32
ПЭТВСДТ	F (155 °C)	«a» 1,32—4,00; «b» 5,60—7,10	«A—a» 0,45—0,47; «B—b» 0,30—0,35	900	300	30—32

Окончание табл. 1.2

Марка провода	Класс нагревостойкости	Номинальные размеры проволоки (по сторонам), мм	Номинальная толщина изоляции (удвоенная по сторонам), мм	Напряжение проводов, В, не менее (после испытания на эластичность)	Прочность изоляции к механическим воздействиям, число двойных ходов иглы, не менее	Относительное удлинение, %, не менее
ПЭТСЛО-1; ПЭТСО-1	F (155 °C)	«a» 0,90—4,00; «b» 2,12—11,60	«A—a» 0,22—0,28; «B—b» 0,22—0,26	1000	400	32
ПЭТСЛО-2; ПЭТСО-2	F (155 °C)	«a» 0,90—4,00; «b» 2,12—11,60	«A—a» 0,28—0,34; «B—b» 0,26—0,30	1500	400	32

Таблица 1.3

**Основные характеристики медных проводов для электрических машин 6—10 кВ
со слюдосодержащей изоляцией**

Марка провода	Номинальная толщина изоляции, мм	Пробивное напряжение изоляции в изогнутом состоянии, кВ	Класс нагревостойкости, °C
ППС	0,36	2	155
ППС-2	0,72	6	
ППЛС	0,36	3	
	0,44	5	
ППСС	0,34	2	
ППСС-1	0,48	3	

Таблица 1.4

**Основные характеристики обмоточных проводов прямоугольного сечения
с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией**

Марка провода	Температурный индекс °C	Номинальные размеры проволоки (по стороне), мм	Номинальная толщина изоляции (удвоенная), мм	Эластичность изоляции	Фактическое пробивное напряжение, кВ, не менее		Фактическая стойкость изоляции к механическим воздействиям. Число двойных ходов иглы
					в металлических шариках (в воде)	между двумя отрезками провода	
ППИПК-Т	200	«a» 1,25—4,00; «b» 4,50—10,00	0,16	Изгиб вокруг стержня, диаметр которого равен четырем размерам большой стороны провода	4	7	> 1000
ППИПК-1	—	—	0,23		6	8	—
ППИПК-2	—	—	0,30		8	10	—

В табл. 1.3 приведены основные характеристики этих проводов.

Для обмоток тяговых двигателей железнодорожного и городского транспорта, угольных комбайнов, специальных типов электрических машин класса нагревостойкости Н и выше применяют медные обмоточные провода с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией марок ППИПКТ, ППИПК-1, ППИПК-2 (табл. 1.4).

1.2. Технология изготовления обмоток

Стержневая обмотка применяется в статорах гидрогенераторов, синхронных компенсаторных и электрических двигателях высокого напряжения.

Стержни статорных обмоток для снижения потерь от вихревых токов выполняют из большого числа параллельных элементарных проводников с площадью поперечного сечения $17\text{--}20\text{ мм}^2$, которые для уменьшения влияния тока определенным образом переплетаются между собой — транспонируются.

На рис. 1.1 показаны транспонированный стержень и изолированные стержни в пазу, на рис. 1.2 — конструкция стержня. В связи с тем что при сборке стержней витковая изоляция проводника подвергается большим механическим нагрузкам, для них в основном применяются провода со стекловолочнистой изоляцией.

Для всех технологических операций разработано специальное оборудование. На рис. 1.3 показано оборудование для автоматизированного нанесения мастик и склеивающих материалов для стержневых обмоток.

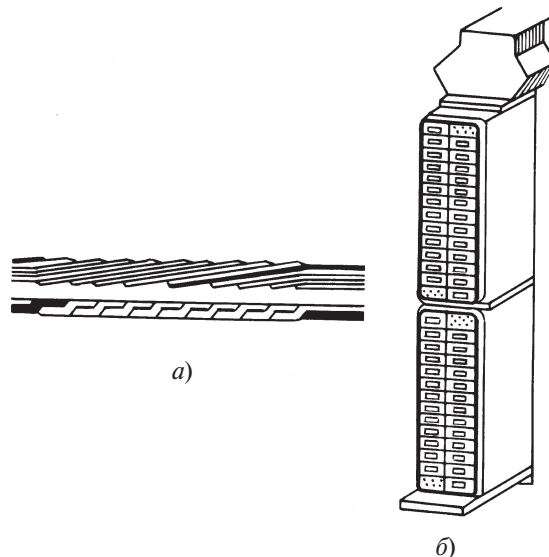


Рис. 1.1. Транспонированный стержень обмотки статора:

a — стержень без корпусной изоляции; *б* — положение стержней в пазу статора

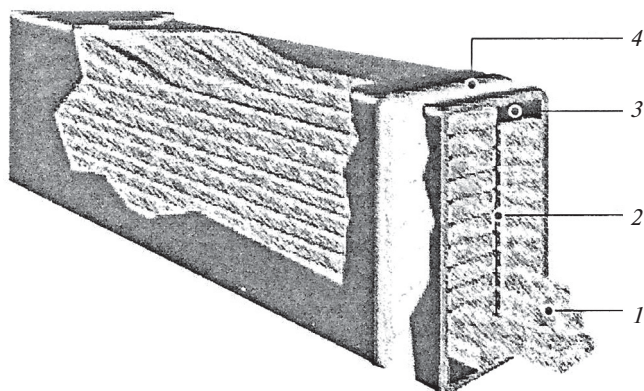


Рис. 1.2. Конструкция стержневой обмотки:

1 — изолированный проводник; 2 — разделитель пакетов проводника; 3 — проводящая или изоляционная мастика; 4 — корпусная изоляция и противокоронная защита

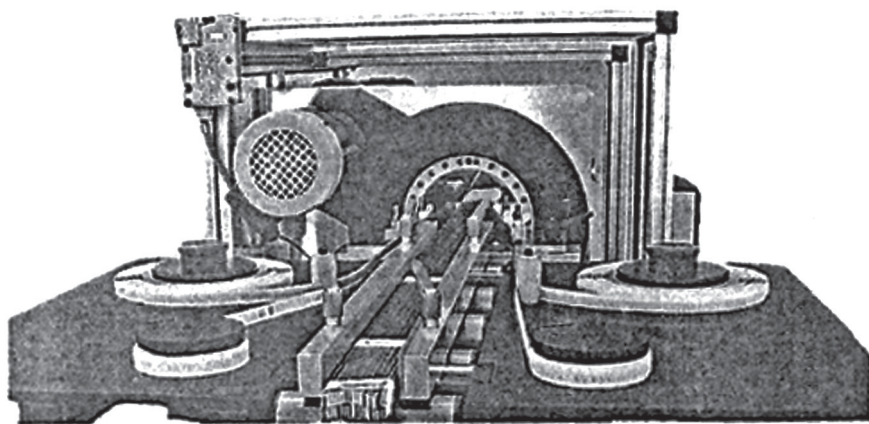


Рис. 1.3. Оборудование для автоматического способа нанесения мастик

После нанесения мастики и склеивающих материалов стержень формуется, прессуется в специальном горячем прессе (рис. 1.4).

Зачищенный после прессования стержень изолируется стеклосодержащими лентами на станках, после вакуумнагнетательной пропитки — сухими лентами или пропитанными лентами (технология Resin Rich). На рис. 1.5 представлен один из видов изолировочных станков. После изолирования стержни направляют на дальнейшие технологические операции.

Катушечные обмотки изготавливают следующим образом. Провод с бухты сматывается на оправку лодочки. Наматывается расчетное количество слоев провода. Затем лодочки снимаются с оправки и на будущую пазовую часть

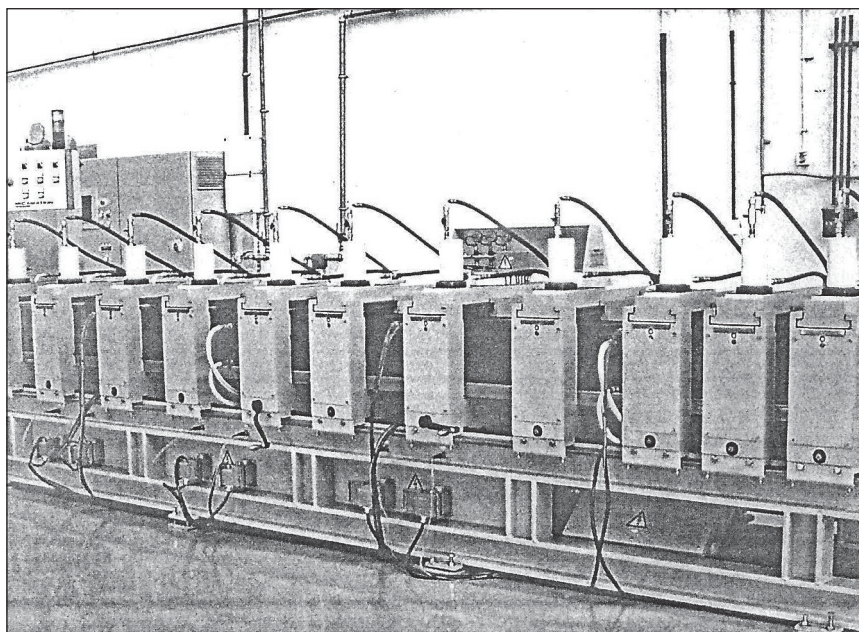


Рис. 1.4. Пресс для опрессовки стержней

наносится эпоксидное связующее (или препрег). Промазка лодочек связующим проводится обязательно в шахматном порядке, т.е. чередуют промазанные и непромазанные части. Через последние происходит качественная пропитка витковой изоляции при одновременной пропитке статора.

Промазанные пазовые части лодочек прессуются до чертежных размеров и запекаются в прессе в течение 30 мин при температуре 120—130 °С. Одновременно в одном прессе прессуются и запекаются 8—10 пазовых частей лодочек. С выпеченными пазовыми частями лодочки растягиваются в катушки. Окончательная форма лобовым частям придается на шаблоне (рис. 1.6).

На лобовые части вручную наносится стеклослюдинитовая лента, остальная часть изолируется на обмоточно-изолировочном станке. Изолированные катушки испытываются и направляются для укладки в статор.

На рис. 1.7 представлена лодочка катушки двигателя мощностью 630 кВт на напряжение 6 кВ. Число витков в катушке составляет семь плюс семь, параллельный проводник в витке один.

Катушка с несколькими параллельными проводниками в витке показана на рис. 1.8. Число витков обмотки равно четырем, параллельных проводников в витке три. Такие обмотки применяют в двигателях мощностью 1250 кВт на напряжение 6 кВ.

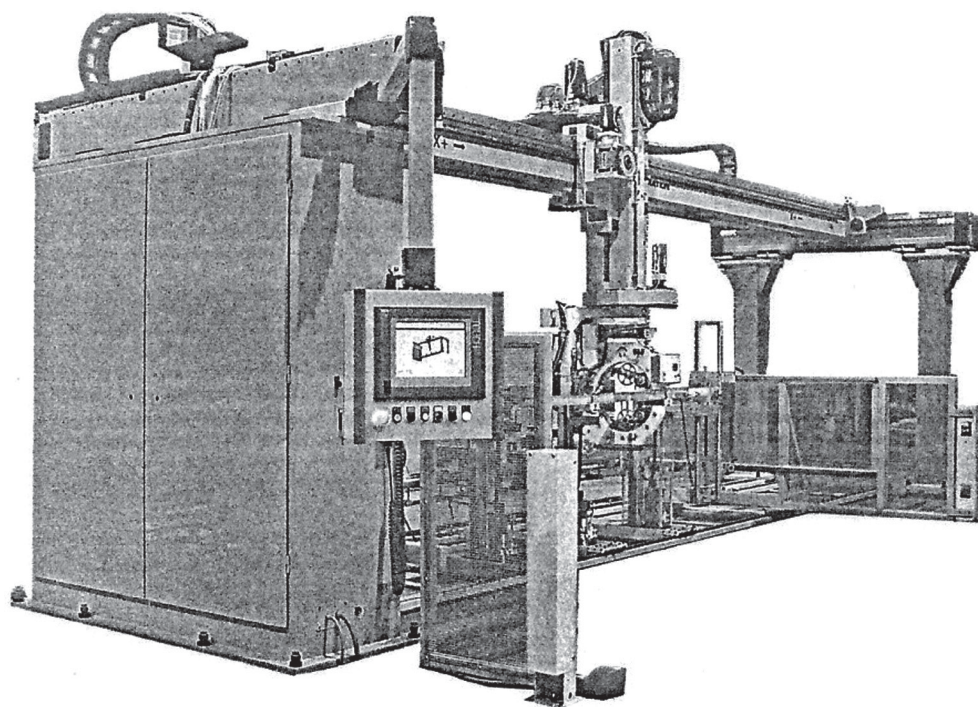


Рис. 1.5. Высокоскоростной станок для намотки лент

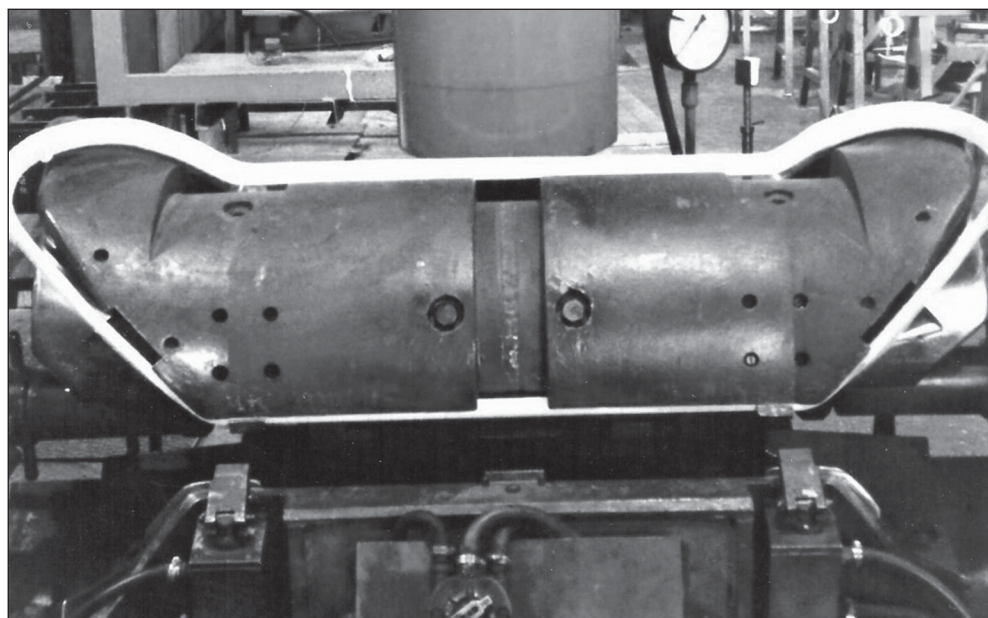


Рис. 1.6. Шаблон для формовки катушек

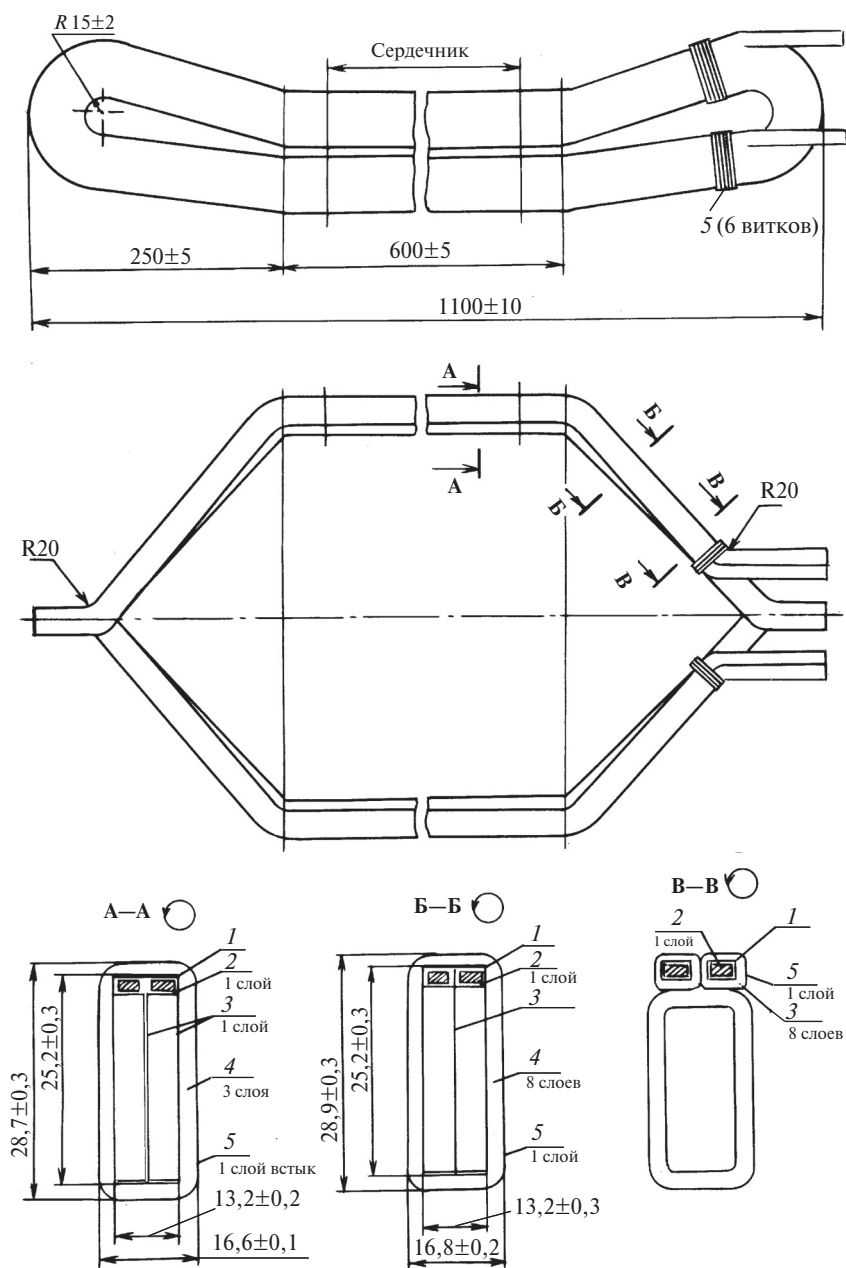


Рис. 1.7. Катушка двигателя мощностью 630 кВт на напряжение 6 кВ:

1 — проводник; 2 — витковая изоляция; 3 — межвитковая изоляция; 4 — корпусная изоляция; 5 — покровная изоляция

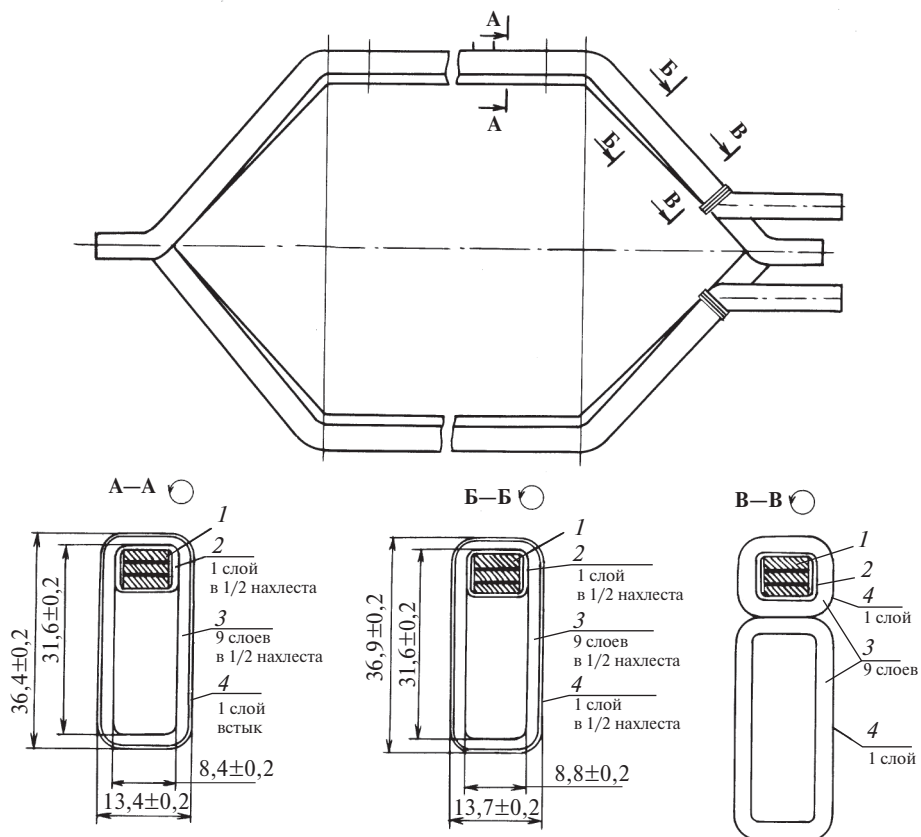


Рис. 1.8. Катушка двигателя мощностью 1250 кВт на напряжение 6 кВ:

1 — проводник; 2 — витковая изоляция; 3 — корпусная изоляция; 4 — покровная изоляция

В настоящее время процесс изготовления изолированных катушек существенно упрощен и многие заводы были оснащены новым оборудованием (рис. 1.9). На намоточном станке заготовки эллипсообразной формы наматываются автоматически. Затем на заготовку наносят непрерывно вкруговую необходимое количество слоев стеклослюдинитовой ленты (рис. 1.10).

Растяжку заготовки проводят на формировочном станке с одновременным получением всех ее геометрических размеров (рис. 1.11). Катушки получают с точными размерами, идентичные одна другой (рис. 1.12).

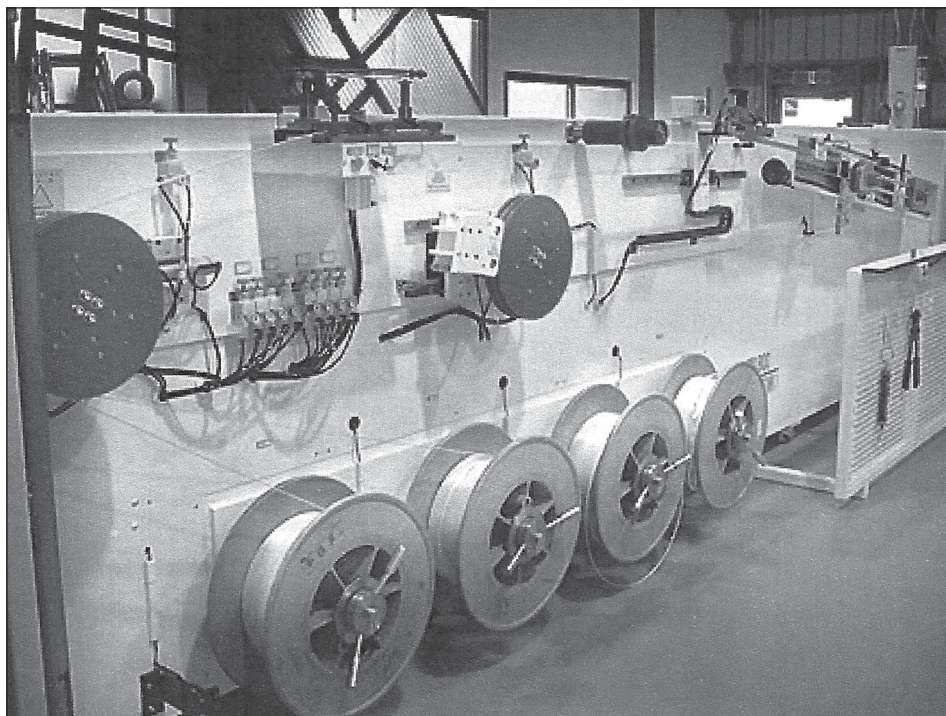


Рис. 1.9. Станок для наматывания заготовок

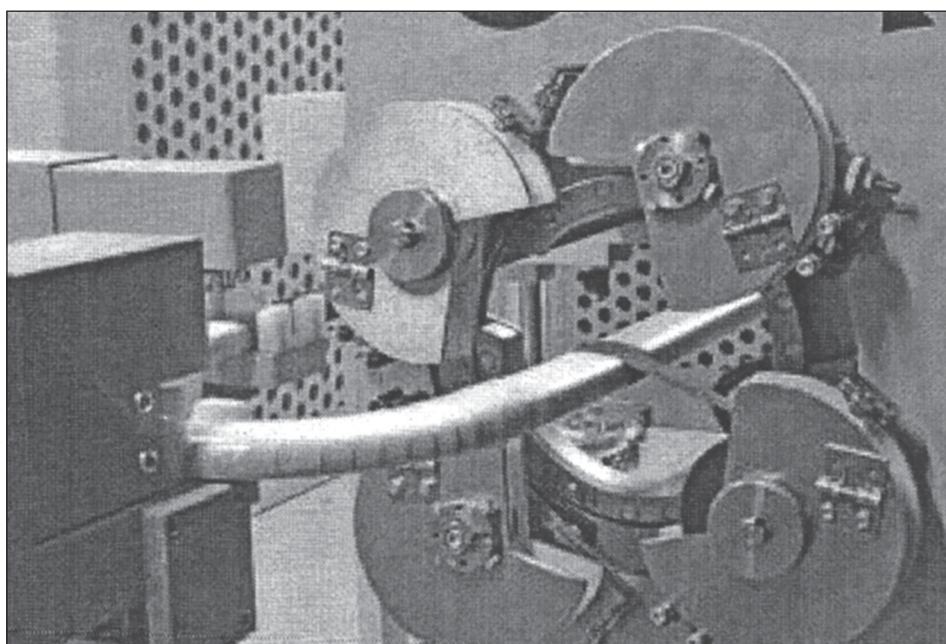


Рис. 1.10. Станок для изолирования заготовок

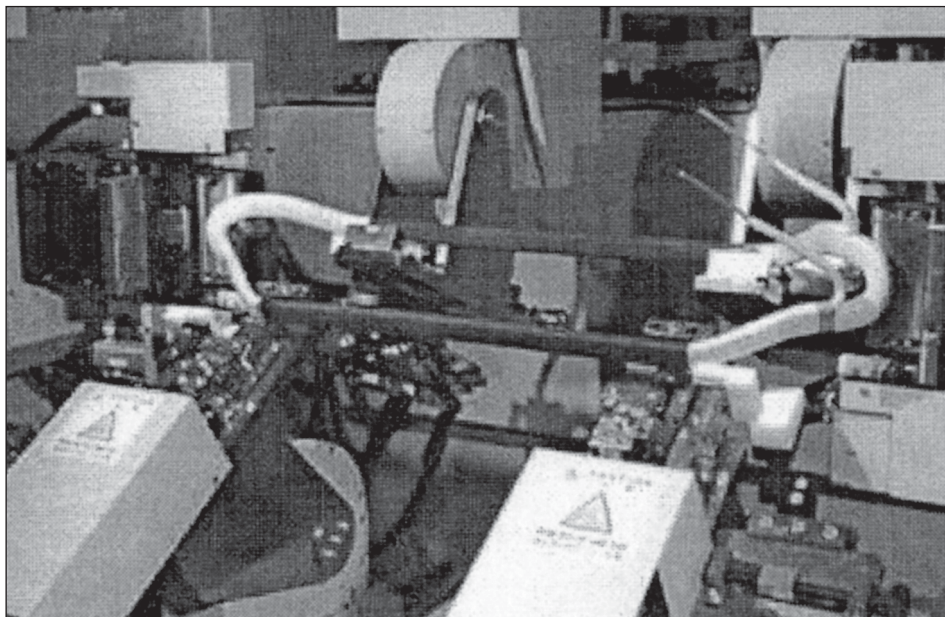


Рис. 1.11. Станок для растяжки заготовок в катушки

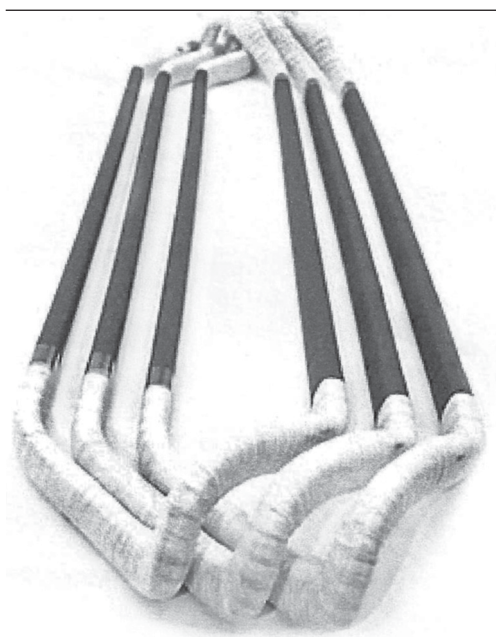


Рис. 1.12. Катушки, готовые к укладке в статор

Способ пропитки статора по технологии «Монолит-2» позволил изменить и технологию изготовления шихтованного сердечника статора, внести ряд новшеств в его конструкцию.

Результаты изготовления первых макетов сердечников статоров с макетами катушек и первого опытного статора электродвигателя показали, что происходит подклейка изоляции макетов катушек и катушек к стенкам пазов. С поверхности макетов и сердечника, из аксиальных и радиальных его каналов пропиточный эпоксидный компаунд практически полностью стекает в процессе запекания без внешнего давления, оставляя только микропенку. В этом случае происходит склеивание листов электротехнической стали за счет проникновения эпоксидного компаунда между ними.

Испытания макетов и сердечника статора подтвердили предположение о возможности изготовления шихтованных сердечников вне корпуса асинхронного двигателя (АД). В этом была необходимость, по крайней мере, в первые годы изготовления статоров с изоляцией «Монолит-2», когда требовалось сократить до минимума объем эпоксидного компаунда, которым заполнялась пропиточная камера. В этот период не было компаунда, способного длительно сохранять рабочую вязкость при температурах пропитки. Пропитка статора вне корпуса позволяла использовать относительно малый объем пропиточного компаунда (до 500 л).

Испытания опытного АД мощностью 500 кВт с изоляцией «Монолит-2» статорной обмотки в жестких условиях и, в частности, при пусках из охлажденного до минусовых температур состояния показали, что сердечник так же как и обмотка, сохранял свою монолитность. С учетом этих результатов у второго опытного АД (мощностью 800 кВт) в качестве нажимных элементов для шихтовки сердечника использовались два склеенных пакета, выполненных из тех же листов электротехнической стали, что и весь сердечник, пропитанных и запеченных по технологии «Монолит-2». Измерения длины сердечника по зубцам и спинке показали, что максимальная «непропрессовка» или отгиб зубцов составили 4 мм, а средний — 1,4 мм при общей длине сердечника 630 мм. При традиционном способе шихтовки с использованием нажимных плит и пальцев допустим отгиб нажимного пальца 5 мм.

Испытания двигателя, когда он прошел 1000 пусков при положительных температурах и 150 пусков при минусовых, показали, что никаких нарушений в склейке крайних пакетов, как и всего сердечника, не произошло. Не произошло и расшихтовки. Таким образом, была доказана возможность замены чугунных нажимных плит и пальцев на клеенные пакеты и использования преимуществ пропитки по технологии «Монолит-2», когда одновременно склеивается и сердечник. Замена нажимных элементов на клеенные пакеты позволила существенно уменьшить массу и длину шихтованного сердечника, что видно из рис. 1.13 и 1.14. В настоящее время технология изготовления клеенных нажимных пакетов позволяет производить их серийно.

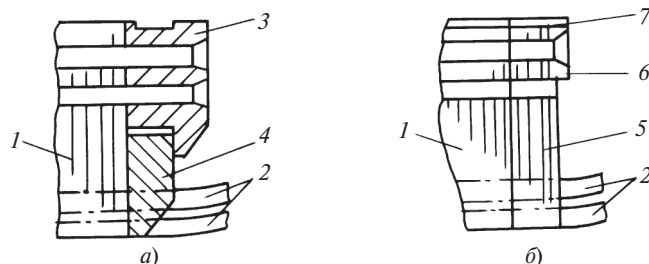


Рис. 1.13. Конструкции торцевой зоны шихтованного сердечника асинхронного двигателя:

а — АТД1; б — АТД2; 1 — шихтованный сердечник; 2 — статорная обмотка; 3 — нажимное кольцо из немагнитного чугуна; 4 — нажимной палец из немагнитной стали; 5 — клеенный нажимной пакет; 6 — нажимное кольцо из Ст 3; 7 — стяжная полоса из Ст 3

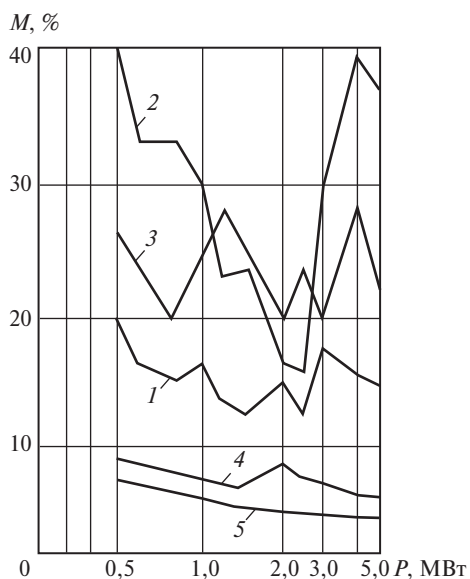


Рис. 1.14. Уменьшение размеров и массы статора АД1 серии АТД2:

1 — масса нажимных плит и пальцев по отношению к массе сердечника АТД1, %; 2 — уменьшение массы сердечника АТД2 по отношению к массе сердечника АТД1, %; 3 — толщина двух нажимных плит по отношению к длине сердечника АТД1, %; 4 — высота двух пальцев по отношению к длине сердечника, %; 5 — уменьшение прямолинейной части катушки с изоляцией «Монолит» по отношению к длине сердечника, %

Таким образом, уменьшение прямолинейного вылета пазовых частей катушек и отказ от нажимных пальцев позволили существенно сократить длину АД от 9,5 до 17 %.

1.3. Снижение напряженности электрического поля на выходе обмотки из паза

Снижение толщины изоляции «Монолит-2» (до 30 %), а также большее значение ее диэлектрической проницаемости по сравнению с ϵ микалентной компаундированной изоляции привели к повышению напряженности электрического поля на выходе обмотки из пазов сердечника. Кроме того, изоляция катушек из непропитанной стеклослюдинитовой ленты ЛСКН-160ТТ в боль-

шей степени подвержена механическим повреждениям при укладке обмотки (порезам об острые углы выхода из паза, проколам). Следовательно, дефекты конструкции зоны выхода из паза необходимо было устранять способом выравнивания электрического поля и предотвращением механических повреждений в процессе укладки, тем более, что у катушек был существенно уменьшен прямолинейный вылет.

Предлагаемый способ выравнивания электрического поля на выходе обмотки из паза для электрической машины на 6 кВ связан с увеличением радиуса закругления углов пакета статора, а также выполнением изоляции из материалов с различными значениями диэлектрической проницаемости. В принципе, у клеевых нажимных пакетов можно увеличить радиус закругления углов, но для серийного изготовления такой способ трудоемок. Градирование же электрического поля за счет изменения значения ϵ изоляционных материалов для изоляции «Монолит-2» в настоящее время неприемлем из-за отсутствия необходимых материалов.

Аналитически определить напряженность электрического поля в изоляционной системе, приведенной на рис. 1.15, не представляется возможным. В связи с этим были проведены расчеты напряженности электрических полей.

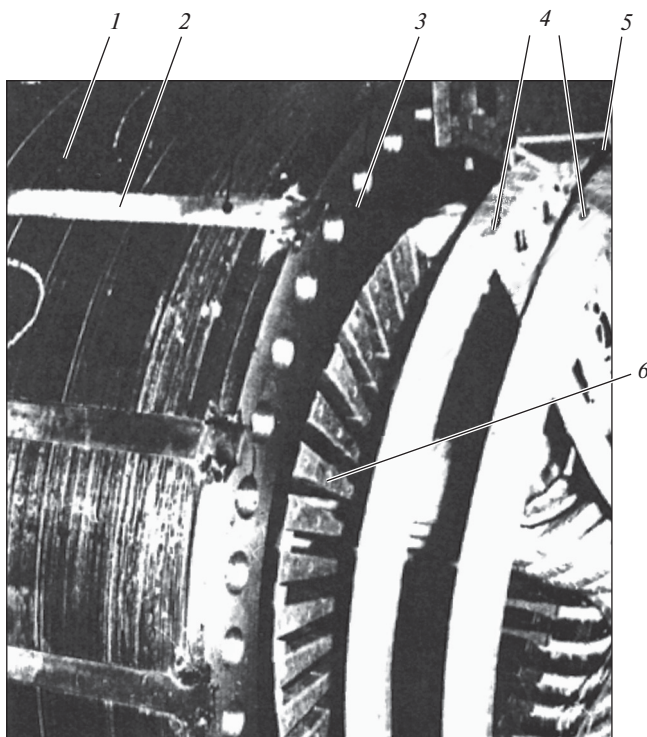


Рис. 1.15. Конструкция шихтованного сердечника статора асинхронного двигателя серии АТД2:

1 — клеевый нажимной пакет из листов электротехнической стали основной позиции; 2 — стяжная полоса из Ст 3; 3 — стяжное кольцо из Ст 3; 4 — стеклопластиковое бандажное кольцо; 5 — пластмассовый кронштейн; 6 — пластмассовая пазовая коробка

Для рассматриваемой системы прямоугольные медные провода — изоляция — сердечник у выхода из паза можно принять электростатическое поле плоским, т.е. двумерным. Такое поле описывается уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (1.1)$$

Рассматриваемая конструкция (рис. 1.16) имеет следующие геометрические размеры: «1—2» — $\delta_{\text{и}}$ (2,1 мм); «5—6» — $10\delta_{\text{и}}$ (21 мм); «4—5» — $b_3/2$ (12,6 мм) $\approx 6\delta_{\text{и}}$ и «2—5» — $10\delta_{\text{и}}$ (21 мм), где $\delta_{\text{и}}$ — толщина изоляции; b_3 — ширина зубца. Граничные линии «1—3—4» и «6—7» выбраны на таком расстоянии от места большей напряженности (точка 5), при котором неточность граничных условий на этих линиях практически не влияет на поле в непосредственной близости (примерно 1 мм) от точки 5.

В задаче принимали следующие граничные условия. Относительный потенциал медной поверхности «1—7» обмотки $\varphi = 1$; потенциал поверхности железа «4—5—6» торца статора и стенок паза $\varphi = 0$. На остальных границах области «1—2—3—4» и «6—7» имеем $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$. Это условие является общепринятым для удаленных линий, искусственно ограничивающих область поля. На линиях раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью задавались условия непрерывности потенциала и скачка его нормальной производной:

$$\varepsilon_- \frac{\partial \varphi_-}{\partial n} = \varepsilon_+ \frac{\partial \varphi_+}{\partial n}. \quad (1.2)$$

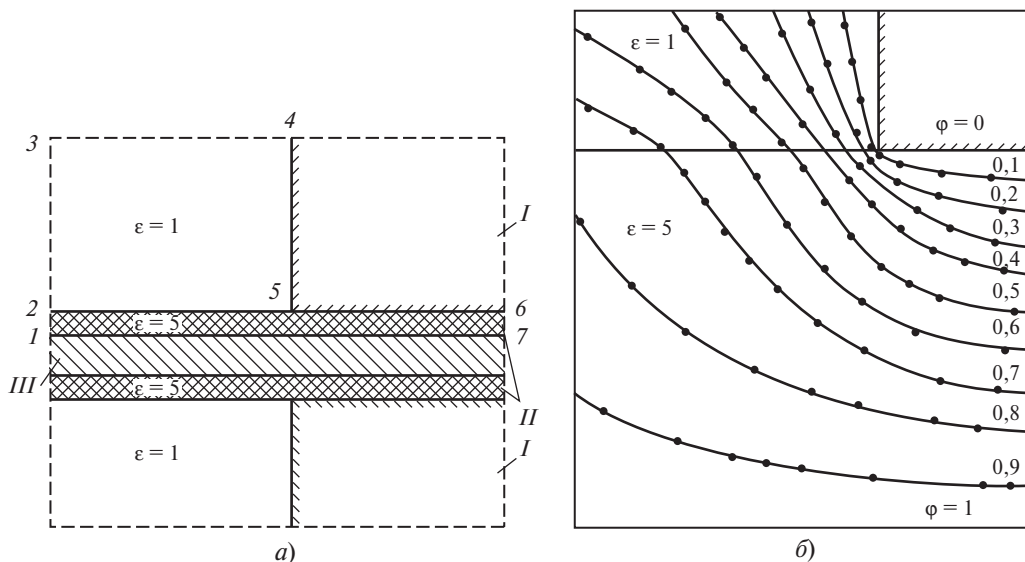


Рис. 1.16. Эскиз выхода катушки из паза (а) и картина электростатического поля (б):

I — шихтованный сердечник; II — изоляция обмотки; III — медный проводник обмотки

Расчеты параметров электростатических полей проводились численно-разностным методом, который широко используют при расчетах магнитных полей электрических машин.

Задачи решались на прямоугольной сетке с количеством узлов 10—15 тыс. Радиус кривизны кромки выхода из паза принимался 0,01 мм, что соответствовало радиусу скругления электротехнической стали при ее штамповке, а шаг сетки (или ячейки сетки) в непосредственной близости к кромке выхода из паза составлял 0,02 мм. Сетка с таким шагом, покрывающая всю расчетную область, содержала бы сотни тысяч узлов. Поэтому в расчетах использовался метод «фокусировки», позволяющий решать задачи на сравнительно крупной сетке (в данном случае 2 мм). Затем в области высокой концентрации поля выделялась подобласть меньших размеров и рассчитывались параметры поля с меньшим шагом. Граничными условиями для подобласти служили значения потенциалов на новых границах, интерполированные по результатам решения на предыдущей сетке.

Разностные уравнения для внутренних узлов имеют вид:

$$\varphi_{i,j} = \frac{1}{P_0} (P_1 \varphi_{i-1,j} + P_2 \varphi_{i,j-1} + P_3 \varphi_{i+1,j} + P_4 \varphi_{i,j+1}), \quad (1.3)$$

где

$$P_1 = \frac{h_{y,j-1} + h_{y,j}}{2h_{x,i-1}}; \quad P_2 = \frac{h_{x,i-1} + h_{x,i}}{2h_{y,j-1}}; \quad P_3 = \frac{h_{y,j-1} + h_{y,j}}{2h_{x,i}}; \quad (1.4)$$

$$P_4 = \frac{h_{x,i-1} + h_{x,i}}{2h_{y,j}}; \quad P_0 = \sum_{k=1}^n P_k,$$

где P — потенциал, зависящий от состояния среды.

Граничное условие на границе раздела сред, например изоляция — воздух, можно записать:

$$\frac{\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}}{h_{x,i-1}} \varepsilon_- = \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{h_{x,j}} \varepsilon_+, \quad (1.5)$$

где

$$\varphi_{i,j} = P_- \varphi_{i-1,j} + P_+ \varphi_{i+1,j}, \quad (1.6)$$

$$P_- = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_+ h_-}{\varepsilon_- h_+}}; \quad P_+ = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_- h_+}{\varepsilon_+ h_-}}. \quad (1.7)$$

Уравнения решались методом итераций с поточной верхней релаксацией:

$$\varphi^{n+1} = \omega_n \varphi_0^{n+1} + (1 - \omega_n) \varphi^n, \quad (1.8)$$

где φ_0 вычислялось по (1.3) с использованием новых $(n+1)$ -го приближения значений в узлах $i-1, j$; $i, j-1$. Первые несколько десятков итераций определялись с коэффициентом релаксации $\omega_n = \omega_0 = 1,0$. Затем ω_n оптимизировался

параметром λ — отношением суммы модулей невязок в двух последовательных итерациях. Условие окончания итераций $\left(\Phi_{i,j}^{n+1} - \Phi_{i,j}^n\right) < \Delta$ для всех значений i, j . При $\Delta = 10^{-4}$ полное число итераций с учетом «фокусировки» составляло несколько сотен, а время, затраченное на решение одного конструктивного варианта, — 20—40 мин.

На рис. 1.16, *а, б* представлены эскиз выхода катушек из паза и картина поля у угла паза, построенная по расчетным данным. Коэффициент неравномерности поля K_ϵ вблизи кромки в воздухе равен 10. Следовательно, напряженность поля, кВ/мм, даже при отсутствии явного технологического дефекта (например, заусенца) составляет

$$E_{\max} = K_\epsilon E_{\text{ср}} = K_\epsilon \frac{U_\phi}{\delta_n} = 10 \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 2} = 17. \quad (1.9)$$

На рис. 1.17 представлена зависимость напряженности электростатического поля в твердой изоляции по мере удаления рассматриваемой зоны от кромки паза (кривая 2). Кривая 3 представляет собой зависимость электрической прочности воздуха при нормальных условиях от толщины воздушного промежутка. Анализ этой зависимости показывает, что у угла паза на удалении от него 20—300 мкм создаются условия для образования частичных разрядов, так как элек-

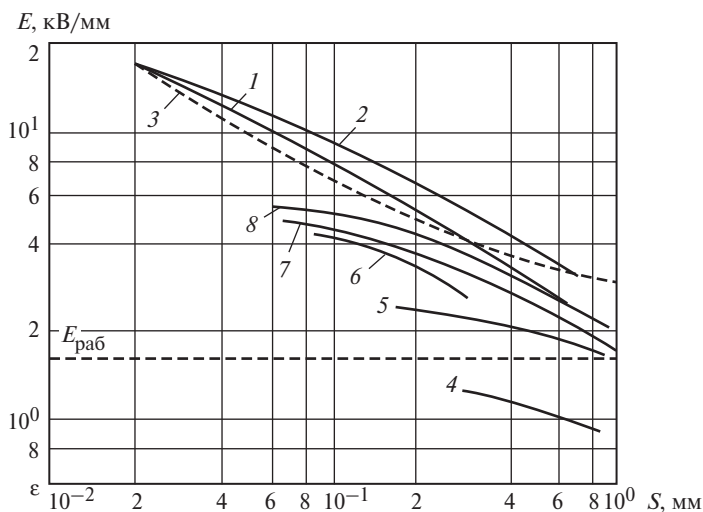


Рис. 1.17. Напряженность электростатического поля в узле выхода обмотки из паза статора:

паз без коробки: 1, 2 — изменение напряженности поля по мере удаления от угла паза в воздухе (вдоль поверхности изоляции) и в изоляции соответственно; 3 — электрическая прочность воздуха; паз с коробкой: 4—8 — зависимости максимальной напряженности поля от толщины изоляции; 4 — в зоне А; 5 — в зоне Б; 6, 7, 8 — в зоне В при отношениях толщин стенок коробок δ_k к толщине изоляции δ_n , равных 1, 0; 0,5; 0,2 соответственно (см. рис. 1.18, *а*)

трическая прочность воздуха меньше действующей на него напряженности поля при рабочем напряжении обмотки.

В рассмотренных конструкциях обмоток (см. рис. 1.17) возможно значительное снижение напряженности поля у угла паза, если вместо воздуха применять изоляцию с диэлектрической проницаемостью, большей, чем у воздуха и основной изоляции. Для выравнивания поля на выходе из паза был предложен способ заполнения воздушной среды в непосредственной близости к кромке пресс-материалом АГ-4С, имеющим диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 10$. Конструктивно пресс-материал используется в виде коробок, надеваемых на торцы зубцов шихтованного сердечника (рис. 1.18).

На рис. 1.17 кривая 4 представляет собой изменение напряженности поля у кромки в зоне *A* по мере удаления рассматриваемой области от угла, а кривая 5 — в зоне *B* от кромки паза. Эти кривые показывают, что напряженность поля в зонах *A* и *B* при применении изоляционных коробок АГ-4С существенно ниже пробивных напряжений воздуха (кривая 3).

В зоне *B* находится так называемый открытый диэлектрический клин, в котором при определенных условиях могут образовываться частичные разряды. Кривые 6, 7 и 8 представляют собой зависимость напряженности поля в зоне *B* от толщины воздушного промежутка в открытом клине при различных значениях толщины изоляционной коробки. При толщинах коробки, равных 0,5 и 1,0 толщины основной изоляции обмотки, напряженность поля (кривые 6 и 7) меньше, чем пробивная напряженность воздуха (кривая 3). При толщине

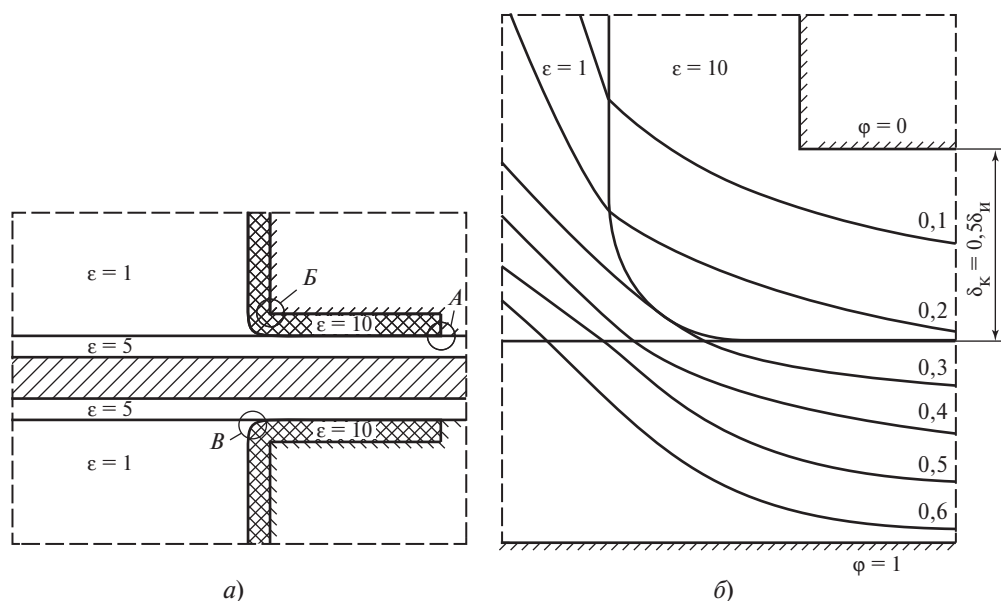


Рис. 1.18. Эскиз выхода катушки из паза с пластмассовой коробкой (*a*) и картина электростатического поля (*б*)

коробки равной $0,5\delta_n$, напряженность в клине (кривая 8) приближается к пробивному напряжению воздуха. С учетом этого обстоятельства, толщина коробки была принята равной 1,2 мм, что соответствует приблизительно половине толщины основной изоляции обмотки (2 мм). Такое соотношение приводит к образованию достаточно низкой напряженности поля во всех рассматриваемых узлах конструкции выхода обмотки из паза (зоны А, Б и В) и обеспечивает достаточную механическую прочность прессованных коробок.

В сериях двигателей АТД4, АДО и ППЧВ применяют конструкции статоров без традиционного корпуса. Пропитка обмотанного сердечника в эпоксидном компаунде по технологии «Монолит-2» придает ему достаточно высокую жесткость и монолитность. Эти свойства сердечника учтены при разработке конструкции, где сердечник статора, наряду с основной функцией магнитопровода, выполняет роль силовой конструкции.

Основная отработка технологии изготовления бескорпусных статоров проводилась на натурных сердечниках статоров генераторов преобразования частоты серии ППЧВ, имеющих малый радиальный размер спинки и поэтому более чувствительных к внешним силовым воздействиям, а из-за малого воздушного зазора (до 1 мм) требующих повышенной точности изготовления.

Основным оборудованием технологического процесса является специально разработанная разжимная регулируемая оправка (рис. 1.19). Регулирование оправки проводится перемещением втулки 2 по остову 1 при помощи болтов 6 и шпилек 7. Наружный диаметр сердечника изменяется по сегментам 3 и при разжатых до заточек на плитах 4, 5 сегментах соответствует внутреннему диаметру сердечника статора. Ввиду того, что регулируемая оправка сложна в изготовлении, увеличение ее срока службы связано с упрочнением трущихся поверхно-

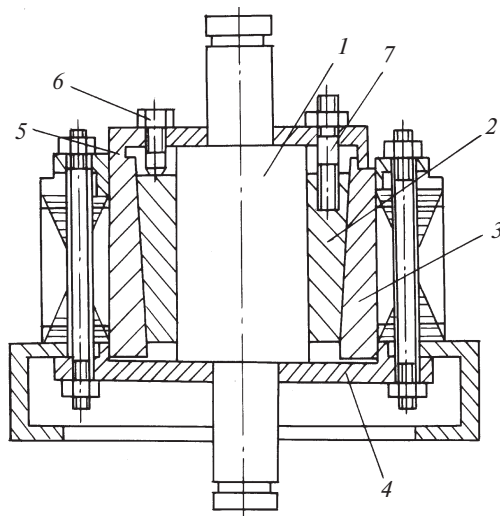


Рис. 1.19. Разжимная регулируемая оправка для шихтовки сердечников статора

стей слоев твердого сплава, нанесенных электроискровым способом. На оправке предусматривалось проводить шихтовку, приварку стяжных ребер и нажимных элементов и механическую обработку посадочных мест сердечника (на токарном станке за одну установку в центрах, установленных в центровые гнезда оправки).

По этой технологии были изготовлены макеты сердечников. На разжатую до упора оправку устанавливалось нижнее нажимное кольцо и клеенный пакет, подогретый до 80—100 °С. Затем шихтовался основной пакет, устанавливались подогретый верхний клеенный пакет и верхнее нажимное кольцо. Сердечник спрессовывался давлением 1,5—2,0 МПа и фиксировался в таком состоянии для сварки. На оправке приваривались ребра к сердечнику и нажимным элементам. Для предотвращения поволоки сердечника приварка ребер проводилась в шахматном порядке. После механической обработки и снятия с оправки проводился тщательный контроль размеров сердечника.

Измерения выявили недопустимо большой эллипс внутреннего диаметра и разную толщину сердечника. Причиной эллипса явились некачественно изготовленные клеенные пакеты, а неравномерности — неодинаковая толщина электротехнической стали. Эти недостатки были устранены шихтовкой клеенных пакетов на основной оправке и проваркой их по спинке перед склейкой и введением выравнивающих сегментов по длине основного пакета. Опытные сердечники, изготовленные по откорректированной технологии, соответствовали требованиям чертежа. Откорректированный технологический процесс был взят за основу для промышленного производства. По этой технологии был изготовлен статор генератора преобразователя типа ППЧВ 500-2,4. При контроле размеров обнаружилась непараллельность привалочных поверхностей сердечника (обработанных на оправке за одну установку), вызванная остаточными напряжениями в сварных швах, которые воспринимались оправкой и вызывали перекося сердечника после снятия с оправки. Таким образом, технологическая жесткость сердечника оказалась недостаточной. Необходимую жесткость сердечнику придали третий клеенный пакет в середине по длине основного пакета и вальцовка трубок тракта водяного охлаждения до приварки ребер.

По уточненной технологии изготовлены статоры генераторов преобразователей ППЧВ 250-10; ППЧВ 250-4; ППЧВ 250-8, испытания которых подтвердили правильность принятых решений.

Тензометрирование проводилось при различных режимах работы и на неработающем преобразователе при эксцентриситете в сторону ребер с наклеенными тензодатчиками. Измерения проводили при нескольких значениях эксцентриситета (1,0—0,2) и разных значениях тока возбуждения для каждого эксцентриситета. При максимальном значении эксцентриситета в режимах холостого хода, номинальной нагрузки, перегрузки по мощности значения относительных деформаций изменяются мало и не превышают $5 \cdot 10^{-5}$ отн. ед., остаточных деформаций не обнаружено.

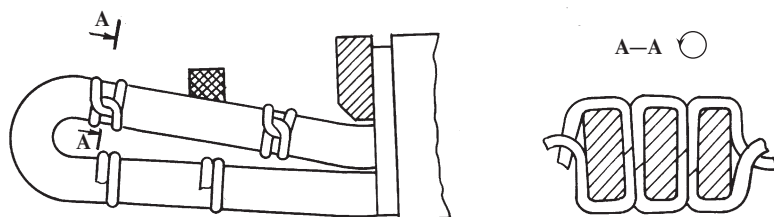


Рис. 1.20. Схема вязки лобовых частей обмотки двумя шнурами

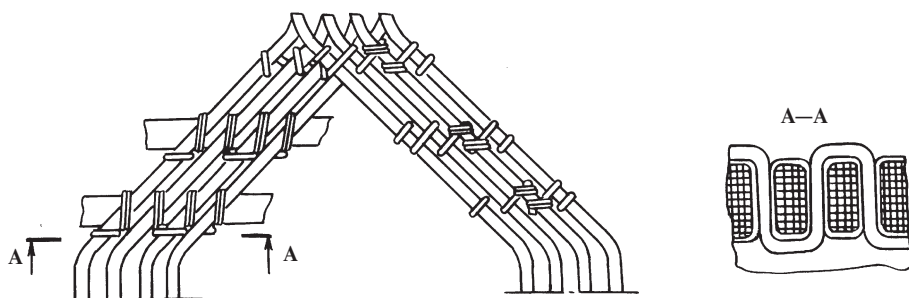


Рис. 1.21. Схема вязки лобовых частей обмотки одним шнуром

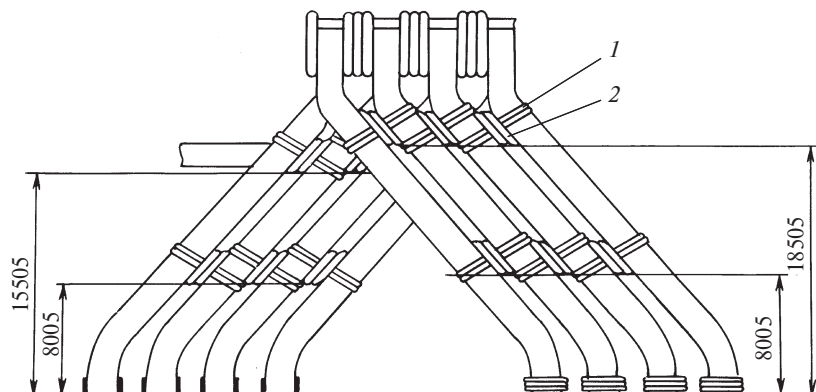


Рис. 1.22. Схема вязки лобовых частей обмотки тонкими стеклошнуром и лавсановым шнуром:
1 — восемь витков; 2 — восемь витков до заполнения прокладки

Для сравнения проводили аналогичные измерения на преобразователе типа ОПЧ 500-2,4, имеющем традиционный корпус. Измерения показали, что устойчивость бескорпусной конструкции преобразователя ППЧВ выше, чем у ОПЧ, на 30 %, что гарантирует его надежную работу.

Надежная работоспособность бескорпусной конструкции подтверждена также результатами ресурсных испытаний натурных образцов двигателей и преобразователей частоты, а также опытом работы серийных машин в условиях промышленной эксплуатации.

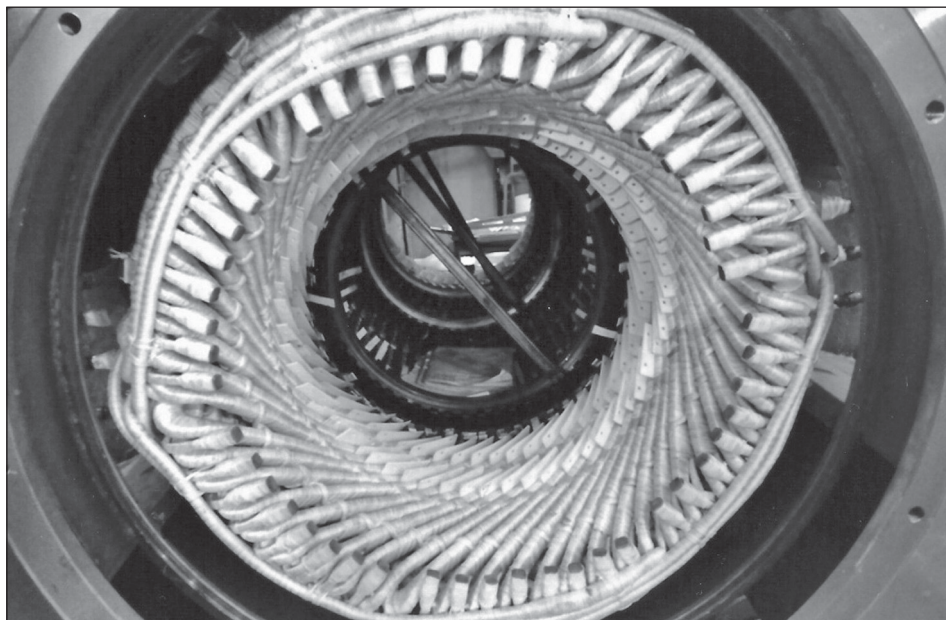


Рис 1.23. Обмотка статора электрической машины

Применение бескорпусной конструкции обеспечивает значительную экономию металла и снижение трудоемкости изготовления. В подготовленный шихтованный сердечник укладываются изолированные катушки. Одним из важных моментов сборки является вязка лобовых частей. Многолетний опыт изготовления двигателей показал необходимость учета зазоров между катушками при использовании для вязки стеклолавсановых шнуров (рис. 1.20). Такой тип вязки применяют при разнице в зазорах до 60 % диаметра шнура.

Вязку одним шнуром, выполняющим только роль дистанционных прокладок, применяют при равномерных зазорах (рис. 1.21). Вязку проводят около бандажных колец при условии, что катушки дополнительно вяжутся к бандажным кольцам (рис. 1.22). В этих случаях между катушками устанавливают дистанционные прокладки из стеклотекстолита. Обмотанный таким образом статор испытывается и направляется на пропитку (рис. 1.23).

Глава вторая

ТЕРМОРЕАКТИВНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

2.1. Технические требования, предъявляемые к изоляции современных электрических машин

Увеличение единичных мощностей генераторов привело к значительному увеличению как электрических, так и механических нагрузок, действующих на изоляцию. Основными факторами, определяющими условия работы изоляции статорной обмотки в процессе эксплуатации генераторов, являются:

- номинальное напряжение;
- номинальный ток;
- рабочие градиенты электрического поля в изоляции в нормальных условиях работы;
- импульсный градиент электрического поля, воздействующий на изоляцию в условиях коммутационных и грозовых перенапряжений;
- механические воздействия на изоляцию в нормальных условиях работы и в режимах внезапных коротких замыканий;
- рабочая температура в самой нагретой точке;
- окружающая среда.

В табл. 2.1 представлены основные факторы и уровни воздействия на корпусную изоляцию статорных обмоток в эксплуатационных условиях для отечественных турбо- и гидрогенераторов в зависимости от их мощности. При коротких замыканиях механические нагрузки на изоляцию возрастают более чем в 50 раз и при увеличении мощности генераторов до максимальной составляют $9 \cdot 10^2 \text{ Н/см}^2$. Исходя из условий эксплуатации к изоляции предъявляются следующие требования:

- изоляция должна быть однородной. Соотношение между стеклотканевыми подложками, слюдяной бумагой, связующим выбирается таким, чтобы обеспечить заданные свойства изоляции: временное сопротивление разрыву в продольном направлении при 20°C не менее $8 \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$ и при 100°C не менее $4 \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$;
- рабочая температура не ниже класса В — 130°C ;
- среднее значение электрической прочности (определенной на отрезках натуральных стержней с толщиной изоляции 3—4 мм) при плавном подъеме напряжения при 20°C не менее 28 кВ/мм, при 100°C не менее 25 кВ/мм;

Таблица 2.1

Основные факторы и уровни воздействия на изоляцию обмоток	Мощность генераторов, МВт					
	Турбогенераторы			Гидрогенераторы		
	до 100	100—500	800—1200	до 150	150—500	Свыше 500
Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	До 10,5	20,0	24,0	10,8—13,8	15,7	18,0
Номинальный ток $I_{ном}$, А	До 7500	7500—17 000	21 400—32 000	7500	6500—21 500	Более 20 000
Рабочий градиент электрического поля в изоляции в нормальных условиях работы E , МВ/м	3,0	3,5	4,0	2,0	2,5	3,0
Механические воздействия на изоляцию в нормальных условиях:						
удельное воздействие на стержень $P_{уд}$, Н/см ²	50	100	150	50	100	150
динамическое воздействие P_d , Н/см	2	6	20	2	6	20
Механические воздействия на изоляцию в режимах внезапных коротких замыканий:						
удельное воздействие на стержень $P_{уд}$, Н/см ²	4000	6000	9000	4000	6000	9000
динамическое воздействие в момент удара изоляции P_d , Н/см	30	120	300	30	120	300
Охлаждающая среда	Водород, воздух, масло	Вода		Воздух		

- при напряженности 10 кВ/мм при рабочей температуре изоляция должна выдерживать не менее 250 ч;
- значение $\operatorname{tg} \delta$ при 20 °С не более 4—5 %, при рабочей температуре 130 °С не более 10 %;
- увеличение $\operatorname{tg} \delta$ при повышении напряжения до $U_{\text{ном}}$ при 20 °С не более 2 %;
- напряжение сдвига изоляции относительно проводников не менее $10 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$;
- изоляция должна выдерживать транспортировку, укладку в пазы статора, крепление обмоток в пазу и соединение 20 головок установленными приемами без снижения электрической прочности;
- теплопроводность изоляции не менее 0,25 Вт/(м · К);
- рабочий градиент $E_{\text{раб}}$ изоляции не менее 2,5—4,0 МВ/м;
- изоляция должна быть устойчивой к циклическим воздействиям температуры в интервале 40—155 °С. После 1200 циклов изоляция должна иметь электрическую прочность не ниже установленных норм контрольного испытательного напряжения;
- изоляция должна выдерживать не менее 500 тыс. вибраций с относительной деформацией $1 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. при напряжении 24 кВ;
- допустимый прогиб изоляции при температуре 20 °С не более 2 мм, при температуре 100 °С 3—8 мм;
- в течение всего срока эксплуатации изоляция должна выдерживать пульсирующее сжатие с амплитудным значением $(3,5 \div 7,0) 10^5 \text{ Н/м}^2$;
- изоляция должна выдерживать ударициклические нагрузки в количестве 200 тыс. ударов с энергией $5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, пробивное напряжение изоляции должно быть не ниже $4U_{\text{ном}}$;
- изоляция должна обладать влагостойкостью и маслостойкостью;

Таблица 2.2

Охлаждающая среда

Тип охлаждения	Среда охлаждения	Мощность турбогенераторов, МВ · А			
		100—160	160—300	300—700	700—1000
Традиционное	Воздушное	—			
	Водородное		—	—	
	Водяное				—
Современное	Воздушное	—	—		
	Водородное			—	
	Водяное				—

- изоляция должна длительно работать в воздушной среде. Суммарное время работы за весь срок эксплуатации 150 тыс. ч;
- допустимая минимальная температура при транспортировке и хранении изолированных обмоток $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В табл. 2.2 приведены современные требования к охлаждающей среде при изготовлении турбогенераторов.

В настоящее время энергетики увеличивают требования к мощности турбогенераторов с воздушным охлаждением от 160 до 300 МВ · А.

2.2. Термореактивная изоляция и электроизоляционные материалы

Термореактивная изоляция Termolastic из сухой стекломикаленты с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой термореактивным связующим была разработана фирмой Westinghouse (США) в 1949 г. Термореактивная изоляция Micalastic из пропитанных термореактивным связующим стеклослюдосодержащих лент с последующей опрессовкой гидростатическим путем в битуме была создана фирмой General Electric (США) в 1958 г.

В качестве основного электроизоляционного материала, применяемого для разработанных термореактивных систем изоляции (Termolastic, Micalastic, Epoterm) применялась щепаная слюда. Изоляция Micalastic изготавливалась из стекломикаленты и стеклослюдинитовой ленты, для остальных типов изоляции в качестве основного диэлектрического барьера применяли слюдяные бумаги Samica и Kogemica.

Необходимо отметить, что в начале развития термореактивной изоляции предпочтение отдавалось натуральной щепаной слюде. В настоящее время для всех разрабатываемых типов изоляции электрических машин высокого напряжения используют слюдяную бумагу. Этот выбор был основан на том, что свойства изоляции на основе слюдяных бумаг, по данным испытаний на макетах и опыта эксплуатации на натуральных обмотках, оказались выше аналогичных свойств, получаемых из изоляции на основе натуральной слюды. Кроме того, электроизоляционные материалы на основе слюдяных бумаг имеют более стабильные характеристики, технологичны в процессе изготовления изоляционных материалов и проведения обмоточно-изоляционных работ.

При изготовлении термореактивной изоляции применяют связующее вещество, так как оно выполняет ряд очень важных функций. Связующее обеспечивает склеивание чешуек слюды между собой, склеивание подложечных материалов со слюдяным барьером, склеивание слоев между собой, приклеивание изоляции к стержню. Связующее в значительной степени определяет как механические, так и электрические свойства изоляции.

При сопоставлении механических характеристик связующих обращает на себя внимание тот факт, что у связующего всех типов при нагреве до температуры $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше прочностные характеристики заметно снижаются, т.е. связующее переходит в высокоэластичное состояние, за исключением изоляции «Орлитерм», у которой прочностные характеристики остаются неизменными

при температурах до 150 °С. Таким образом, в зависимости от типа исходных смол (эпоксидных, полиэфирных) связующие составы имеют различные механические характеристики и разный характер зависимости этих характеристик от температуры. В начале 70-х годов прошлого века был получен положительный эксплуатационный опыт как на связующих, которые при рабочих температурах становятся более эластичными, так и на связующих, которые сохраняют при рабочих температурах жесткое стеклообразное состояние (табл. 2.3).

Среди полимеров, применяемых в системах изоляции, ведущее место принадлежит эпоксидным смолам. Кроме синтеза и модификации эпоксидных смол активные работы проводились в области создания улучшенных активаторов с латентными свойствами из числа новых комплексов трехфтористого бора с аминами, солей четвертичных аммониевых и фосфониевых оснований, различных хелатов, производных имидазола и имидазолина. Также велись работы по созданию стабилизаторов вязкости для систем эпоксидная смола — ангидрид с использованием для этих целей монокарбоновых кислот, новых эпоксисодержащих активных разбавителей (длинноцепные диглицидиловые эфиры). Поэтому фирмы по производству слюдосодержащих лент в настоящее время имеют широкий ассортимент лент как для изоляции, выполняемой из предварительно пропитанных лент, так и для изоляции, изготавливаемой методом вакуум-нагнетательной пропитки.

Одновременно с развитием электроизоляционной техники существенно усовершенствовалась и технология изготовления изоляции электрических машин и генераторов высокого напряжения. Примером такого совершенствования изоляции может служить ряд работ, выполненных ведущими зарубежными фирмами Toshiba (Япония), Alsthom (Франция), General Electric.

Фирма Toshiba в 70-х годах закупила лицензию по производству изоляции Micapal у фирмы General Electric. Эта изоляция получила название Tosrich. Вначале были применены два вида изоляции из пропитанных лент на полиэфирном и на эпоксидном связующем. Изоляция стержневых обмоток выполнялась из чередующихся слоев лент: стекломикаленты и ленты на основе бумаги самика и стеклоткани. Затем фирма стала применять преимущественно изоляцию из ленты на основе слюдяной бумаги самика и стеклоткани, пропитанной эпоксидным компаундом. Эта система была усовершенствована с применением эпоксиноволачной смолы со специальными отвердителями.

Процесс изготовления изоляции состоит из следующих операций:

- обмотки изолируют пропитанными лентами;
- на обмотки на напряжение 6,6 кВ и выше наносят полупроводящие ленты;
- головки катушек изолируют лентой, пропитанной силиконовым эластомером. Затем пазовые части обмотки:
- отверждают при температуре 150 °С в течение 1 ч в прессе при давлении $20 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ (от $10 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ с постепенным увеличением до $20 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$);
- охлаждают до температуры 50 °С, извлекают обмотки из пресса; при этом подпрессовка составляет 35 %.

Таблица 2.3

Основные системы изоляции зарубежных фирм

Фирма	Система изоляции	Слюдяной материал		Смола		Технологический процесс		Подложечный материал для лент	
		слодяная бумага	щепаная слюда	полиэфирная	эпоксидная	пропитанные ленты	вакуум-нагнетательная пропитка	стекло	синтетическая бумага
National	Neccobond	(x)*	x	x			x		x
Electric	Neccobond	(x)*	x		x		x		
Coil	Epoxy								
Westing-house	Termolastic	(x)*	x	x			x		x
General Electric	Micapal	x	x		x	x	(x)**	x	x
Kraftwerk Unior	Micalastic	(x)*	x		x		x		
Brown-Boveri	Micadur	x			x		x	x	
English Electric	Thermica	x			x	x		x	
ASEA	Micapact	x			x		x	x	
Mitsubishi		x	x		x		x	x	

* Мелкими чешуйками,

** Гидростатическая опрессовка битумом.

Лобовые части и головки:

- отверждают при температуре 130 °С в течение 30 мин (применяются самоусаживающиеся при температуре ленты);
- укладывают катушки в статор и осуществляют пропитку статоров машин высокого напряжения в лаке с последующим отверждением при температуре 150 °С в течение 1,5 ч.

Фирма Toshiba создала изоляцию Tostait-2 методом вакуум-нагнетательной пропитки для статоров обмоток электрических машин высокого напряжения, а позднее изоляцию Tostait-1 для стержневых обмоток генераторов большой мощности. Для этой изоляции используют ленты, склеенные небольшим количеством эпоксидной смолы с двухатомными фенолами во избежание рассыпания тонких чешуек слюды во время механической намотки. Связующее вещество не содержит отвердителя, но может содержать ускоритель. Также применяют слюдяную бумагу на основе слюды флогопит, которая при изготовлении бумаги не подвергается химической или термической обработке. Лента из такой бумаги отличается хорошей впитываемостью, что важно для изоляции, подвергаемой вакуум-нагнетательной пропитке.

Процесс изготовления системы изоляции путем полной пропитки обмоток статоров Tostait-2 состоит из следующих операций:

- наложения корпусной изоляции и защитной стеклоленты, в лобовых частях — усаживающейся полиэфирной пленки;
- вакуумной пропитки при остаточном давлении $1,3 \cdot 10^2$ Па и температуре 40 °С;
- увеличения давления после пропитки до $7 \cdot 10^5$ Н/м², выдержки до 15 ч;
- выдержки при комнатной температуре после извлечения из котла в течение 12 ч;
- отверждения при температуре 130 °С в течение 5 ч и при температуре 150 °С в течение 15 ч.

Процессы изготовления стержней с изоляцией Tostait-1 и Tostait-2 аналогичны. Пропиточный состав для обоих вариантов изоляции имеет вязкость 0,60 сП при температуре 25 °С, поэтому пропитка может осуществляться при низкой температуре. Компаунд состоит из модифицируемой эпоксидной смолы и жидкого отвердителя ангидридного типа. Срок хранения компаунда продолжительный, и потерь компаунда вследствие повышения вязкости нет. Температура тепловой деформации компаунда составляет 151 °С. После 25 тыс. ч старения при температуре 170 °С потери массы компаунда достигают 3 %, поэтому этот компаунд отнесен к классу нагревостойкости F. Компаунд обладает повышенной стойкостью к воздействию химических веществ и растворителей, в том числе сильных растворов щелочей и трихлорэтилена. Состав имеет хорошие электрические характеристики и стабильные значения $\tan \delta$ до температуры 170 °С.

На стенде фирмы Toshiba были проведены циклические испытания стержней генераторов мощностью 600 МВт при воздействии термомеханических нагрузок. Было выполнено 1000 циклов: нагрев от 40 до 160 °С в течение 55 мин, охлаждение от 160 до 40 °С в течение 45 мин. Как показали результаты испытаний, значения $\tan \delta$ и остаточной деформации практически не изменились в течение всех пусков и составили 0,006 и $(0,8 \div 1)10^{-4}$ отн. ед. соответственно.

Изоляция Isotenax применяется фирмой Alsthom в турбо- и гидрогенераторах мощностью до 910 МВт и напряжением до 24 кВ для турбогенераторов с водородным охлаждением и до 500 МВт и 18 кВ для воздушных гидрогенераторов. Характеристики этой изоляции удовлетворяют требованиям эксплуатации по своим диэлектрическим свойствам в соответствии с нагрузками, имеющими место при непрерывной эксплуатации, и при исключительных условиях наивысших нагрузок, таких как при включении в противофазе. Однако рост мощностей турбогенераторов привел к значительному увеличению механических нагрузок, что заставило разработать изоляцию, сохраняющую наиболее высокие свойства во всем интервале температур, соответствующем эксплуатации этих машин.

Эпоксидная смола с полиэфирным отвердителем, используемая для изоляции Isotenax, имела температуру стеклования 65 °С. Сопротивление на изгиб и модуль упругости при этой температуре уменьшаются. Диэлектрические потери возрастают при температуре 120 °С; при температурах, соответствующих классу нагревостойкости F, коэффициент рассеяния и фактор потерь достигают больших значений, что ограничивает применение этой изоляции по классу F.

Замена эпоксидной смолы с длинной цепью на смолу с короткой цепью или на полифункциональную эпоксидную смолу типа новолака, а полиэфирного отвердителя на полифенольный позволяет увеличить температуру перехода на 60 °С.

Механические характеристики остаются практически неизменными до температуры 120 °С, а диэлектрические потери — малыми до температуры 160 °С. Этот вариант изоляции Isotenax назвали Isotenax-N, чтобы отметить двойной характер новолака, одного из составляющих эпоксиды и одного из отвердителей. Фирма Alsthom считает возможным использование изоляции Isotenax-N для генераторов мощностью до 2000 МВт, напряжением 30 кВ с толщиной изоляции 6,5 мм на сторону. Кроме того, фирма разработала два типа изоляции для машин высокого напряжения. Это изоляция, изготавливаемая методом вакуум-нагнетательной пропитки, Porozival. Технология ее изготовления аналогична технологии изготовления изоляции Micadur — компакта фирмы Brown-Boveri (Швейцария).

Изоляцию Durival изготавливают из лент, пропитанных составом на основе эпоксिनволачной смолы со специальными отвердителями, позволяющими резко сократить процесс прессования изоляции. Кроме того, новое связующее обеспечило хорошие диэлектрические свойства изоляции, например электрическую прочность не ниже 30 кВ/мм, и наименьшую зависимость диэлектриче-

ских потерь при повышении температуры. Изоляция Durival обладает высокими механическими свойствами, такими как значительные прогибы при изгибе и усилия при разрыве, которые мало изменяются при температуре 150 °С.

Фирма General Electric, выполнив разработку второго поколения изоляции Micasal, с учетом достижений в области создания синтетических смол, обеспечила конструкторам большую свободу выбора для получения оптимальных электрических, механических и термических свойств. В качестве связующего благодаря высоким механическим, электрическим характеристикам и химической стойкости была выбрана эпоксидная смола. Применение смолы было обусловлено и тем, что в лабораториях фирмы долгое время велись работы в области эпоксидных полимеров, причем при разработке руководствовались двумя решающими взаимовлияющими факторами: функциональными характеристиками и пригодностью для производства. Из функциональных характеристик первостепенное значение приобретали механические свойства: ударная прочность, стабильность размеров при сжимающих нагрузках, прочность на сжатие и растяжение при рабочих температурах и равных скоростях увеличения прикладываемых нагрузок. При создании ленты проводилась оценка слюдяной бумаги, подложки и самой ленты. Такие характеристики слюдяной бумаги, как однородность по толщине и диэлектрическим свойствам, вносят важный вклад в характеристики изоляционной системы, обеспечивая функциональную надежность турбогенераторов.

Специалисты фирмы считают, что отказ от использования щепаной слюды в качестве противокоронного барьера является шагом вперед с точки зрения характеристик изоляции и надежности изоляционной системы. В некоторых условиях изоляция, содержащая щепаную слюду, более подвержена повреждениям под влиянием механических сил, действующих на проводник в магнитном поле. Начало разрушения или пыления чешуек слюды наблюдается в условиях, значительно превышающих существующие рабочие нагрузки. Хотя, в настоящее время это не причиняет беспокойства, но может представлять опасность в будущем. В качестве подложки в ленте использовали с одной стороны стеклоткань, с другой — тонкий нетканый материал, защищающий слюдяную бумагу от истирания. Испытания по определению влияния подложки на пробивные характеристики показали, что система стеклоткань — нетканый материал по сравнению с подложками стеклоткань — стеклоткань имеет более высокое среднее время до пробоя и более стабильные характеристики. Такие ленты имеют высокие прочностные свойства. Так, при термостарении при температуре 200 °С в течение 16 недель у ленты для Micasal-2 после 12 недель остаточная прочность на изгиб составляла около 70 %. Определение относительного индекса ударной вязкости на листовых образцах слюдяного материала показало, что, если для системы, содержащей щепаную слюду, принять его за 100, то для применяемой в настоящее время системы, содержащей только слюдяную бумагу, он составляет 267, а для материала Micasal-2 — 483. Если вторая цифра

показывает, какое повышение ударной вязкости достигается за счет перехода к слюдяной бумаге, то третья — как повышает ударную вязкость вновь разработанное связующее. Такие ленты имеют хорошие технологические характеристики.

Дальнейшие испытания проводились на лабораторных образцах стержней, имеющих площадь поперечного сечения и толщину изоляции натуральных стержней и длину 1,524 м. Испытания показали, что стержни обладают высокой динамической механической прочностью, термостойкостью и стабильностью размеров, обеспечивающими надежность турбогенераторов большой мощности.

Фирма Isola Werke (Швейцария) разработала изоляцию Samicaterm на основе пропитанных стеклослюдинитовых лент. В качестве слюдяной применяют бумагу Samica. Пропитывающие смолы применяются в основном на основе эпоксиново-лачных смол, модифицированных эпоксидных смол, полиуретановых и т.п.

Фирмой ASEA разработана система изоляции Micafold для электрических машин высокого напряжения переменного тока, обеспечивающая повышение их мощности до 15 %. Обмотка выполнена из медных эмаль-проводов, изолированных каландрированной бумагой Nomex 419 толщиной 0,08 мм, представляющей собой смесь 50 % слюды и 50 % арамидного волокна. Бумага Nomex 419 используется вместо стеклослюдоленты и стекловолокнистой изоляции. Новая система изоляции имеет высокую стойкость к частичным разрядам, исключает риск разрыва изоляции при опрессовке обмоток. Повышение мощности достигается за счет увеличения содержания меди в пазу без изменения его размеров. Обмотка Nomex 419 ведется встык. Чтобы избежать нахлеста, намотку ведут так, что на трех сторонах проводника образуется сплошное покрытие, на четвертой — между краями ленты имеются промежутки. Укладка проводников ведется так, что эта сторона с несплошной изоляцией примыкает к сторонам со сплошной изоляцией. Проводники обращены узкой стороной к главной изоляции, что обеспечивает им дополнительную защиту. Изоляция между витками имеет повышенную электрическую прочность. Новая система изоляции может быть применена в других типах вращающихся электрических машин и в трансформаторах, где обмотки выполнены из эмаль-проводов и стержней.

Фирма Brown-Boveri, проведя большие исследовательские работы, разработала систему изоляции Mikadur для стержневых обмоток генераторов. Изготовление изоляции Mikadur представляет собой непрерывное наложение сухих непропитанных слюдосодержащих лент с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой синтетической смолой. Стержни после пропитки извлекаются из ванны, опрессовываются и запекаются в прессе. Фирма выпустила большое количество генераторов, в том числе турбогенераторов мощностью 1650 кВ · А на напряжение 28 кВ.

Хорошие электрические, термические и механические свойства этой изоляции способствовали ее быстрому внедрению в производство целого ряда крупных электрических машин. Поэтому, когда перед фирмой был поставлен вопрос об использовании современной системы изоляции для статорных обмоток синхронных и асинхронных машин мощностью от нескольких сотен до нескольких

тысяч киловатт, то за основу была взята технология изготовления изоляции Mikadur. Обмотки статоров таких машин обычно выполняются в виде катушек, сделанных на оправках. Катушки устанавливаются в пазы статора, где они образуют двухслойную обмотку. При установке в пазы статора катушки подвергаются некоторой деформации. Отвержденная изоляция таких нагрузок не выдерживает. Поэтому возникла необходимость модифицировать процесс изготовления изоляции Mikadur для новых машин, сохранив, насколько было возможно, столь хорошо зарекомендовавшие себя материалы и смолу. В результате была создана новая система изоляции Mikadur compact, в которой пазовая и лобовые части катушек обматывались стеклослюдосодержащей лентой на основе интегрированной слюды, а пропитка и отверждение изоляции катушек и опорных элементов выполнялись после установки обмотки в статор.

Фирма Isovolta (Австрия) разработала две системы изоляции:

1. Изоляция Calmica на основе пропитанных лент. Эластичные и гибкие ленты состоят из слюдяной бумаги (преимущественно Samica), которая пропитана высококачественной циклоалифатической эпоксидной смолой, и термостойкой полиэфирной пленки.

2. Изоляция Vacuvolt на основе сухих стеклосодержащих непропитанных лент из бумаги Kogemica с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой эпоксидной смолой. Применяемая смола Vostostat представляет собой смесь двух компонентов: смолы Vostostat-100 и отвердителя Vostostat-90. Эпоксидно-ангидридный компаунд обладает низкой вязкостью при температуре пропитки (при температуре 70 °С вязкость ниже 20 сП), низкой реакционной способностью при температуре пропитки и высокой при температуре отверждения.

Получаемая таким образом изоляция по своим характеристикам аналогична изоляции Micadur compact.

Фирма Mitsubishi выпускает изоляцию для электрических машин высокого напряжения без традиционного применения слюдосодержащих лент. Технология изготовления системы изоляции состоит в том, что обмотку помещают в водорастворимый лак, который наполнен интегрированной слюдой. По проводнику пропускают постоянный ток. Под действием электромагнитного поля происходит электрофоретическое осаждение частичек слюды на обмотку, причем склейка слюдинок осуществляется лаком, входящим в раствор. Такая технология обеспечивает очень быстрое наращивание толщины изоляции: для создания изоляции толщиной 4 мм необходимо всего 2 мин. Получаемая таким образом изоляция проходит стадию сушки и вакуум-нагнетательную пропитку эпоксидным составом. По существу, получается чистая изоляция из слюды и компаунда, не содержащая каких-либо технологических подложек, необходимых для нанесения на обмотку слюдосодержащего слоя при обычной технологии. Поэтому изоляция обладает очень хорошими электрическими свойствами, которые мало изменяются в зависимости от толщины изоляции и от времени старения при высоких температурах.

Анализируя информацию по созданию и улучшению систем термореактивной изоляции ведущих зарубежных фирм, можно сделать следующие выводы:

- основное усовершенствование идет по пути создания новых пропиточных составов, обеспечивающих более высокие электрические и механические характеристики и их малую зависимость от температуры вплоть до рабочих температур. Это эпоксिनволачные смолы для пропитанных лент и модифицированные эпоксидные смолы для вакуум-нагнетательной пропитки;

- все ведущие фирмы отказались от применения щепаной слюды, заменив ее на слюдяную бумагу типа Samica или Kogemica, обеспечив тем самым более стабильные характеристики изоляции, особенно при термоциклировании;

- при применении слюдяных бумаг Samica или Kogemica для изоляции из пропитанных лент в основном используют бумагу Samica, но имеется тенденция перехода на бумагу типа Samica с более крупными частицами слюды. Для изоляции, изготавливаемой методом вакуум-нагнетательной пропитки, в основном применяется бумага Kogemica;

- в качестве подложек слюдосодержащих лент широко используют полиэфирные пленки, полиэфирную бумагу и ткани;

- в области технологии изготовления изоляции электрических машин высокого напряжения усовершенствование идет по пути существенного сокращения процессов изготовления изоляции. Так, нахождение изоляции из пропитанных лент в прессовочном оборудовании сокращено до 2 ч. Стабилизация свойств проводится в свободном состоянии в термостате, по технологии изготовления изоляции методом вакуум-нагнетательной пропитки непосредственно изоляционной ленты или в пропиточный состав вводят ускорители полимеризации компаунда, обеспечивающие его малую реакционную способность при рабочих температурах и высокую в процессе отверждения;

- для генераторов большой и малой мощности используют изоляцию из пропитанных лент и изоляцию, изготавливаемую методом вакуум-нагнетательной пропитки;

- для двигателей высокого напряжения, особенно небольших размеров (основная масса двигателей), используют изоляцию, полученную методом вакуум-нагнетательной пропитки. Такая изоляция обеспечивает высокие технико-экономические показатели двигателей. Ряд фирм (Alstom, Toshiba и др.) разработали новые системы изоляции для вакуум-нагнетательной пропитки. Для двигателей больших габаритов существуют две технологии изготовления в зависимости от того, какое оборудование имеется на фирме (опыт фирмы Brown-Boveri);

- при изготовлении изоляции (фирма Mitsubishi) для электрических машин высокого напряжения вместо слюдосодержащих лент применяют в качестве изоляции слюду, нанесенную на изоляцию проводника электрофоретическим методом с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой. Отказ от самой трудоемкой части технологии изготовления изоляции — изготовления электроизоляционных материалов и обмоточно-изолирующих работ — позволяет предположить, что данные разработки очень перспективны.

Таблица 2.4

**Усовершенствованные системы изоляции и применяемые
электроизоляционные материалы ведущих зарубежных фирм**

Фирма (страна)	Система изоляции и применяемые материалы	Усовершенствованная изоляция и применяемые материалы
General Electric (США)	Micapal. Ленты на основе щепаной слюды через слой с лентой на основе слюдяной бумаги типа Samica, пропитанные эпоксидной смолой с растворителем	Micapal-P. Ленты на основе только бумаги типа Samica с пропиткой эпоксидной смолой без растворителя, с высокой ударной вязкостью
Alsthom (Франция)	Isotenax. Ленты на основе слюдяной бумаги типа Samica, пропитанные эпоксиполиэфирным лаком	Isotenax-N. Ленты на основе бумаги типа Samica, пропитанной лаком на основе бисфенольной и новолачной смол (разработка новой бумаги Samica с более крупными чешуйками слюды). Porozival. Ленты на основе бумаги Kogemica, предназначены для вакуум-нагнетательной пропитки. Durival. Ленты на основе бумаги типа Samica, пропитанные эпоксиноволачным связующим
Toshiba (Япония)	Tosrich (Micapal). Ленты на основе щепаной слюды через слой с лентой на основе слюдяной бумаги типа Samica, пропитанные эпоксиднополиэфирным связующим	Tosrich. Ленты на основе бумаги типа Samica и Kogemica, пропитанные эпоксиноволачной смолой. Tostait-1. Ленты на основе бумаги типа Samica и Kogemica, предназначенные для вакуум-нагнетательной пропитки стержневых обмоток. Tostait-2. Ленты на основе бумаги типа Samica и Kogemica, предназначенные для вакуум-нагнетательной пропитки двигателей высокого напряжения
ASEA (Швеция) } Brown-Boveri (Швейцария) }	Micapact. Ленты на основе слюдяной бумаги Samica с вакуум-нагнетательной пропиткой	Micapact. Ленты на основе слюдяных бумаг Samica и Kogemica с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой.
	Micadur, Micadur-compact	Micadur compact.
	Ленты на основе бумаги типа Samica для вакуум-нагнетательной пропитки	Ленты на основе бумаги типа Kogemica для вакуум-нагнетательной пропитки
Van Roll Isola (Швейцария)	Samicaterm. Ленты на основе слюдяной бумаги типа Samica, пропитанные эпоксидным составом	Samicaterm. Ленты на основе бумаги типа Samica, пропитанные эпоксиноволачной смолой
Siemens (Германия)	Micalastic. Микалента и ленты на основе бумаги Samica для вакуум-нагнетательной пропитки	Micalastic. Ленты на основе бумаги типа Kogemica для вакуум-нагнетательной пропитки

Окончание табл. 2.4

Фирма (страна)	Система изоляции и применяемые материалы	Усовершенствованная изоляция и применяемые материалы
Isovolta (Австрия)	Calmica. Ленты на основе бумаги типа Samica и Kogemica, пропитанные модифицированной циклоалифатической смолой	Vacuvolt. Ленты на основе бумаги типа Kogemica для вакуум-нагнетательной пропитки
Mitsubishi (Япония)	Ленты на основе шепаной слюды с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой смолами на основе ненасыщенных полиэфиров или смесью из бисфенола А и циклоалифатической смолы	Ленты на основе интегрированной слюдяной бумаги типа Kogemica с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой модифицированной эпоксидной смолой бисфенол А с ангидридными отвердителями. Resin-Rich. Ленты на основе бумаги Samica, пропитанные эпоксисиловолачной смолой

Обобщенные данные по усовершенствованным системам изоляции ведущих зарубежных фирм даны в табл. 2.4. Учитывая, что свойства всех разработанных систем изоляции примерно одинаковы, а для их изготовления применяются материалы, состоящие из одних и тех же компонентов, большинство электромашиностроительных фирм отказались от собственных разработок и получают материалы и пропиточные составы у производителей. Основным поставщиком материалов на основе слюдосодержащих (50—60 % мирового рынка) является фирма Isovolta (Австрия). Прежде всего это материалы: Poroband, Porofab, Porofas для вакуум-нагнетательной пропитки (VPI); Calmicafab, Calmica, Calmicaglos для Resin-Rich-технологии. Фирма Van Roll Isola (Швейцария) поставляет материалы: Samicapog для вакуум-нагнетательной пропитки; ленты Samicatherm, Filosam, Samicaflex для Resin-Rich—технологии.

2.3. Отечественные виды терморезистивных систем изоляции и материалы

Развитие высоковольтной изоляции генераторов и двигателей в Советском Союзе было связано с неуклонным ростом единичной мощности оборудования. Возросла единичная мощность турбо- и гидрогенераторов. Рост мощностей электрооборудования предъявил ряд новых требований как к самой изоляции, так и к вспомогательным электроизоляционным материалам. Традиционно применяемая микалентная компаундированная изоляция практически не отвечала возросшим требованиям и уступала новым видам терморезистивной изоляции.

В России, как и в зарубежной практике, технология изготовления обмоток генераторов и электрических машин высокого напряжения ведется по двум направлениям:

- изоляция, изготавливаемая из пропитанных стеклослюдосодержащих лент с последующей опрессовкой в пресс-форме или гидростатическим путем — битумом в котле (изоляция слюдотерм, ВЭС-2);

- изоляция, изготавливаемая из сухих слюдосодержащих лент с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой эпоксидным компаундом (изоляция типа «Монолит»).

Для стержневых обмоток генераторов в основном применяются ленты с подложками из стеклоткани, а для катушечных обмоток двигателей высокого напряжения — ленты с подложками из стеклоткани, полиэфирной бумаги или пленки.

В качестве связующих лент применяют низко- и высокомолекулярные эпоксидные и полиэфирные смолы, эпоксидитольные связующие. В качестве пропитывающего компаунда используются бисфенольная эпоксидная смола и жидкий отвердитель ангидридного типа.

Процесс гидростатической опрессовки, который пришел на смену опрессовке в пресс-формах, позволил существенно улучшить стабильность характеристик получаемой изоляции, особенно на местах перехода от пазовой части к лобовой.

В связи с тем что процесс изготовления изоляции из пропитанных лент очень продолжителен, были проведены работы по замене связующего таким, которое обеспечивает более высокие характеристики изоляции с одновременным сокращением технологического режима ее изготовления. Связующее на основе эпоксисиловачной смолы с отвердителем — комплексом трехфтористого бора с моноэтиламином обеспечивает высокие электрические характеристики изоляции и позволяет сократить более чем в 5 раз время прессования изоляции. Время нахождения изоляции в пресс-форме или битумном котле в подпрессованном состоянии сокращается до 3 ч, а стабилизацию свойств изоляции можно проводить в свободном состоянии. Удалось также отказаться от опрессовки изоляции битумом, заменив битум на газовую среду — азот или воздух, что позволило существенно упростить процесс изготовления изоляции и улучшить санитарно-гигиенические условия в обмоточно-изолирующих цехах. Изоляция, изготавливаемая методом вакуум-нагнетательной пропитки, типа «Монолит», имеет очень высокие электрические и механические свойства, так как отверждение пропиточного состава в изоляции происходит под давлением. Впоследствии эта изоляция была существенно упрощена и усовершенствована.

Для термореактивной изоляции создан ряд электроизоляционных материалов, обеспечивших широкое ее использование в промышленности:

- полупроводящие эмали и медьсеребросодержащие ленты, обеспечивающие создание противокоронных покрытий генераторов и электродвигателей на все напряжения;
- полупроводящие волнистые и плоские прокладки, необходимые для уплотнения стержневых обмоток в пазу;
- препреги, обеспечивающие закрепление обмоток, формирующие цилиндрические материалы, необходимые при укладке обмоток, препреги для формирования обмоток;
- шнуры стеклонаполненные, применяемые для вязки обмоток в лобовых частях и вместо дистанционных прокладок и ряд других материалов.

В Советском Союзе и в России с обоими типами термореактивной изоляции выпущено и эксплуатируется несколько сотен турбогенераторов, более ста гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, десятки тысяч электродвигателей различной мощности и напряжения. Подробные исследования, проведенные в последнее десятилетие, показали, что изготавливаемые типы термореактивной изоляции имеют близкие характеристики и обеспечивают высокую надежность и долговечность обмоток генераторов и электродвигателей высокого напряжения. Как показывают данные по эксплуатации, отдельные группы генераторов имеют наработку около 100 тыс. ч, надежность работы генераторов с термореактивной изоляцией по сравнению с микалентной компаундированной повысилась, сократились аварии генераторов из-за пробоя изоляции. Таким образом, более чем 30-летний опыт эксплуатации генераторов с термореактивной изоляцией показал высокую эксплуатационную надежность разработанных видов термореактивной изоляции (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Основные виды отечественной термореактивной изоляции

Наименование системы изоляции	Состав изоляции	Основные технологические операции	Область применения
«Монолит-1»	Слюдинитовая бумага, оклеенная с двух сторон стеклотканью; содержание связующего 4—6 %	Намотка сухими стеклослюдинитовыми лентами, сборка в пакет с фиксацией пазовой части в пресс-планках, укладка в пропиточную коробку с эластичными стенками, помещение в котел, вакуумирование, подача расчетного количества пропиточного эпоксидного компаунда ПК-11, опрессовка горячей водой и отверждение под давлением	Стержни гидрогенераторов, синхронных компенсаторов, катушечные обмотки крупных электрических машин большого диаметра с разрезкой лобовых частей шаговых секций при укладке
«Монолит-2»	Слюдинитовая бумага, оклеенная с двух сторон стеклотканью; содержание связующего 4—6 %; введен ускоритель отверждения эпоксидного компаунда	<i>Стержневая обмотка</i> Намотка сухими стеклослюдинитовыми лентами, сборка в пакет с фиксацией пазовой части в пресс-планки, укладка в пропиточную коробку или в пропиточный котел, вакуумирование, пропитка эпоксидным компаундом ПК-11, выдержка под давлением, слив компаунда, отверждение без давления	Стержневые обмотки турбо- и гидрогенераторов, синхронных компенсаторов, статоров двигателей, полная пропитка обмотанного статора турбогенератора с воздушным охлаждением

Продолжение табл. 2.5

Наименование системы изоляции	Состав изоляции	Основные технологические операции	Область применения
«Монолит-2»	—	<i>Катушечная обмотка</i> Намотка сухими лентами, укладка в статор, установка статора в пропиточный котел, вакуумирование, пропитка эпоксидным компаундом ПК-11, выдержка под давлением, слив компаунда, извлечение статора из котла отверждения в термостате	Обмотки тяговых электродвигателей электровозов, тепло-возов, городского и пригородного транспорта, погружных электродвигателей, двигателей угольных комбайнов и т.п., сухих трансформаторов
«Монолит-3»	Слюдинитовая бумага, оклеенная с двух сторон стеклотканью; содержание связующего 4—6 %	Намотка сухими лентами катушек, пропитка отдельных катушек по технологии «Монолит-2», закладка пропитанных катушек в статор и термообработка	Двигатели высокого напряжения большого диаметра ввиду отсутствия пропиточного котла для пропитки двигателей
«Монолит-4»	Слюдинитовая бумага, оклеенная с двух сторон стеклотканью; содержание связующего 4—6 %; введен ускоритель отверждения эпоксидных смол	Намотка сухими лентами стержневых или катушечных обмоток с большим числом слоев. Опрессовка и фиксация заданного размера, укладка стержней в пропиточную емкость, катушек в статор и пропитка по технологии «Монолит-2»	Обмотки турбо- и гидрогенераторов, синхронных компенсаторов, двигателей высокого напряжения
«Монолит-5»	Микалентная компаундированная лента, отработавшая свой эксплуатационный срок. Слюда, пропитанная эпоксидным компаундом	Укладка стержней в специальную емкость, удаление под вакуумом и при температуре битумного связующего. Нанесение на отоженную изоляцию стержней покрывной ленты и укладка в пропиточную емкость, пропитка и отверждение по технологии «Монолит-2»	Для ремонта стержневых обмоток турбо- и гидрогенераторов с микалентной компаундированной изоляцией, отработавшей эксплуатационный срок
«ВЭС-2»	Два слоя слюдинитовой бумаги, оклеенные с двух сторон стеклотканью и пропитанные эпоксидно-полиэфирным компаундом К-110; содержание связующего 25—35 %	Изолирование стержней пропитанной лентой с промазкой каждого слоя компаундом К-110. Опрессовка и отверждение в прессе	Стержневые обмотки турбо- и гидрогенераторов. Катушки двигателей высокого напряжения при ремонте

2.3. Отечественные виды терморепактивных систем изоляции и материалы

Окончание табл. 2.5

Наименование системы изоляции	Состав изоляции	Основные технологические операции	Область применения
«Слюдотерм»	Слюдинитовая бумага, склеенная со стеклотканью и пропитанная эпоксидитольным связующим; содержание связующего 25—35 %	Изолирование стержней пропитанными лентами с подогревом. Опрессовка и отверждение в пресс-формах или в котле гидростатической опрессовкой битумом	Стержневые обмотки турбо- и гидрогенераторов. Гильзовый вариант изоляции катушек для двигателей высокого напряжения
«Монотерм»	Слюдинитовая бумага, склеенная со стеклотканью и пропитанная эпоксидоволачным связующим; содержание связующего 25—35 %	Намотка пропитанными лентами стержневых обмоток с подогревом (при применении модифицированного эпоксидоволачного связующего подогрев не требуется). Опрессовка и запекание в пресс-форме или гидростатическим давлением битумом в котле	Стержневые обмотки турбо- и гидрогенераторов
«Термолит» F, H, C	Для вакуум-нагнетательной пропитки Слюдинитовая бумага, склеенная со стеклотканью с одной стороны, с другой — или стеклоткань, или пленка ПЭТФ, или полиимидная пленка; содержание связующего 4—6 % или 9—15 % полиэфиримидного связующего соответствующего класса нагревостойкости	Намотка пропитанными или сухими лентами или лентами с повышенным содержанием связующего обмоток электрической машины и пропитка по технологии «Монолит-2» полиэфиримидным компаундом «Элпласт-155 ИД» или «Элпласт-180 ИД» или «Элпласт-220 ИД» в зависимости от класса нагревостойкости обмотки	Обмотки тяговых электродвигателей электровозов, тепловозов, пригородного и городского транспорта, двигателей угольных комбайнов, большегрузных автомобилей, сухих трансформаторов
	Для пропитанных лент Слюдинитовая бумага, склеенная со стеклотканью с одной стороны, с другой — или стеклоткань, или пленка ПЭТФ, или полиимидная пленка, пропитанная полиэфиримидным компаундом; содержание связующего 25—35 %	—	—

Глава третья

МИКАЛЕНТНАЯ КОМПАУНДИРОВАННАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

3.1. Технология изготовления обмоток с микалентной компаундированной изоляцией

Микалентную компаундированную изоляцию (МКИ) изготавливают из микаленты, содержащей до 30 % битумно-масляных связующих и до 8 % летучих. После наложения на катушку (стержень) определенного количества слоев микаленты изоляция пропитывается битумом.

Наличие большого количества летучих в микаленте требует сушки изоляции при температуре 165—175 °С в течение 10—11 ч, из них первые 5 ч при атмосферном давлении, а последующие при остаточном давлении около $3 \cdot 10^3$ Па.

Большое содержание связующего в микаленте затрудняет пропитку изоляции битумом, поэтому ее проводят под избыточным давлением около $8 \cdot 10^5$ Па и при температуре 155—165 °С (для снижения вязкости битума) до 24 ч. Для обеспечения качественной сушки и пропитки их обычно проводят после наложения каждых шести-семи слоев микаленты. Следовательно, многостадийность и продолжительность (до 34 ч для одной стадии) является характерной особенностью изготовления обмоток с МКИ.

Битумы и битумно-масляные лаки термопластичны, и они определяют зависимость электрических и механических свойств обмоток от температуры.

Целлюлозные материалы, используемые в качестве подложек микаленты, обладают невысокой нагревостойкостью, со временем при рабочих температурах в них наступает термическая деструкция.

Микалента состоит из пластинок щепаной слюды большого размера, чем определяется неравномерность ее толщины и существенно неодинаковая электрическая прочность в различных точках по длине ленты. Изготовление щепаной слюды характеризуется большими отходами сырья и трудоемкостью ее изготовления (применяется в основном ручной труд).

Для выполнения статорной обмотки катушками с МКИ используются бандажные кольца из немагнитной стали, к которым крепятся лобовые части катушек. Кольца крепятся к сердечнику или с помощью стальных шпилек, изолированных миканитом или бакелизированной бумагой, или кронштейнами через изоляционные прокладки. Перед установкой колец на них наносится изоляция в основном из микаленты с послойной промазкой битумным лаком.

В связи с тем, что МКИ в холодном состоянии жесткая, в период всего процесса укладки катушек в статор их поддерживают в нагретом состоянии. Прогрев изоляции до температуры 75—90 °С проводится или в термостате, или пропуском тока по катушкам. При укладке двухслойной катушечной обмотки

требуется поднимать стороны шаговых катушек, поэтому они подвергаются трехкратному нагреву в процессе укладки.

Изготовление шихтованных сердечников статоров АД серии АД1 (с МКИ статорных обмоток) мощностью 500—8000 кВт проводилось общепринятыми способами. Внизу корпуса статора, расположенном в вертикальном положении, крепились массивная нажимная плита и нажимные пальцы. Электротехническая сталь, сегментная или круглая, шихтовалась на аксиальные ребра статора «ласточкиными хвостами» и на калибры пазовыми отверстиями. Сверху нашихтованного сердечника помещались такие же нажимные пальцы и плита, что и снизу; под прессом сердечник прессовался и фиксировался в запрессованном состоянии. Нажимные плиты, изготовленные из немагнитного чугуна с отверстиями для аксиальных охлаждающих каналов, и нажимные пальцы, изготовленные из немагнитной стали, удерживают электротехническую сталь сердечника в запрессованном состоянии в течение всего срока службы АД и составляют существенную долю в массе и длине сердечника (табл. 3.1, рис. 3.1). Применение достаточно массивных плит и пальцев необходимо для выполнения качественной запрессовки шихтованного сердечника. Слабая запрессовка может привести к вибрации стали, повреждению обмотки, ослаблению крепления сердечника и нажимных пальцев. Например, проведенный анализ отказов машин переменного

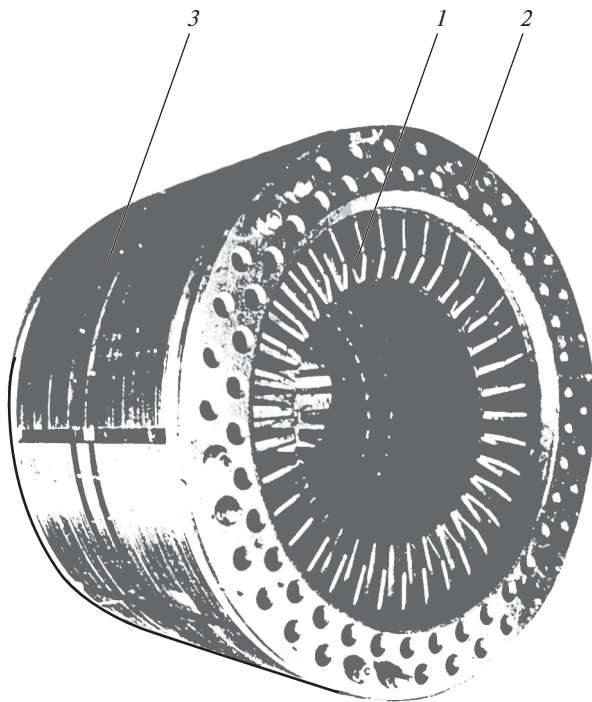


Рис. 3.1. Конструкция шихтованного сердечника серии АД1:

1 — нажимной палец; 2 — нажимная плита; 3 — шихтованный сердечник

Таблица 3.1

**Вес и размеры элементов шихтованных сердечников
асинхронных двигателей серии АД1**

Размер	Мощность, кВт										
	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3000	4000	5000
Масса сердечника статора АД1 (без обмотки) M_c , кг	1210	1460	1730	1970	2300	2690	2660	3220	6800	7420	8250
Масса нажимных плит и пальцев $M_{пл} + M_{п}$:											
кг	243	243	243	297	297	297	410	410	1245	1245	1245
%	20	16	14	15	13	11	15	12	18	16	15
Длина сердечника L_c , м	0,47	0,53	0,63	0,53	0,64	0,76	0,66	0,81	0,78	0,87	0,98
Толщина двух нажимных пальцев, $2L_{п}$, м	0,048	0,048	0,048	0,046	0,046	0,046	0,056	0,056	0,056	0,054	0,054
Толщина двух нажимных плит, $2L_{пл}$, м	0,13	0,13	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15	0,12	0,22	0,22	0,22
$\frac{2L_{пл}}{L_c}$, %	26	24	19	28	23	19	23	18	28	25	22
$\frac{2L_{п}}{L_c}$, %	9	8	8	8	7	5	8	7	7	6	6

тока (12—18-х габаритов) показал, что из 101 обследованного электродвигателя на двух произошли отказы из-за плохой запрессовки и вибрации сердечника. Срок работы до аварии составил от 2 мес до 12 лет.

Проведенный анализ исходных материалов, технологии изготовления МКИ и катушечных статорных обмоток на ее основе применительно к крупным электрическим машинам высокого напряжения показал следующее: высокую продолжительность ее изготовления, использование дефицитной и трудоемкой в изготовлении щепанной слюды, применение термопластичных битумов и бумажных подложек, которые и определяют свойства изоляции. В шихтованном сердечнике нажимные плиты и пальцы выполняют чисто конструкционную роль, не несут электромагнитных нагрузок, но составляют существенную долю в его массе и габаритных размерах.

3.2. Опыт эксплуатации статоров с микалентной компаундированной изоляцией статорных обмоток

Надежность работы двигателей в большой степени определяется качеством ее изоляции, а пробой изоляции статоров по своим последствиям являются одним из наиболее тяжелых видов аварий. Согласно имеющейся информации для двигателей высокого напряжения собственных нужд электростанций аварии из-за пробоя изоляции составляли 54 % общего числа аварий, в том числе повреждение корпусной изоляции — 32 %, витковой — 22 %. В отдельных случаях повреждаемость изоляции в местах выхода из пазов статора в 2—3 раза выше, чем на других участках. Изоляция двигателей, работающих в тяжелых условиях (повышенная температура, вибрация, влага, загрязнение), изнашивается через 4—5 лет.

Центральным проектно-конструкторским технологическим бюро крупных электрических машин (ЦПКТБ КЭМ) была проведена работа по изучению эксплуатационной надежности двигателей высокого напряжения. Всего было обследовано 1596 двигателей мощностью от 100 до 1000 кВт и свыше 1000 кВт у 32 заказчиков (металлургические, цементные заводы, химические и коксохимические комбинаты, шахты, ГРЭС и ряд других предприятий). Статорные обмотки на напряжение 3—6 кВ были выполнены в основном с МКИ. В табл. 3.2 представлены сводные данные по отказам.

Согласно приведенным данным половина всех отказов двигателей высокого напряжения приходится на статорную обмотку. Распределение отказов статоров: витковые замыкания — 56 %; пробой корпусной изоляции — 44 %. Классификация причин отказов статорных обмоток, составленная по данным опросных листов, показала следующее: естественное старение изоляции и усыхание статорных клиньев составляет 22 %; попадание масел на обмотку — 9 %, дефекты изготовления — 30 %; неправильная эксплуатация — 33 % и по неустановленным причинам — 6 %.

В связи с увеличившимся в последнее время количеством пусков двигателей высокого напряжения на ТЭС, что связано с изменением характера нагрузки — переводом блоков в режим регулирования нагрузок с частыми их остановками и пусками, возросло удельное число отказов этих двигателей.

По данным, в которых приведены результаты обследований отказов двигателей высокого напряжения 10 блоков ГРЭС за 1964—1974 гг., у двигателей

Таблица 3.2

Количество отказов узлов электродвигателей

Узел, в котором произошел отказ	Количество двигателей, шт.	Число отказов, %
Статор	287	50,5
Ротор	103	18,6
Прочие узлы	173	30,9
Всего	563	100

мельниц отказы из-за пробоя изоляции составили 28 %; в среднем срок службы статорных обмоток был 5 лет. У двигателей мельничных вентиляторов отказы из-за пробоя изоляции составили 22 %; наработка двигателя на первый отказ из-за пробоя изоляции примерно 6 лет. По двигателям питательных насосов отказы из-за пробоя изоляции составляют значительную долю (до 60 %). Причиной повреждений может являться конструктивный недостаток крепления лобовых частей, не обеспечивающего достаточной жесткости обмоток при пусках двигателей.

В табл. 3.3 приводятся значения удельной повреждаемости некоторых электрических двигателей собственных нужд блоков 150, 200, 300 МВт, определенные по данным нескольких электростанций за период 1965—1972 гг.

Одна из основных причин выхода из строя электродвигателей — повреждение обмоток статора (75—85 % всех случаев), при этом чаще всего повреждение происходило в момент пуска двигателей. Были исследованы динамические режимы асинхронного короткозамкнутого электродвигателя типа АЗ-12-52 мощностью 630 кВт на номинальное напряжение 6 кВ, используемого в системе собственных нужд блочных агрегатов мощностью 200 МВт. В начальный момент пуска максимальное значение перемещения катушки статора как на выходе из паза, так и в лобовых частях отмечено в радиальном направлении и составляло соответственно 230—280 и 45 мкм. Полученные данные по вибрации в режимах пуска свидетельствуют о неудовлетворительном состоянии крепления статорной обмотки, что могло явиться причиной ее повреждения. Одним из направлений повышения надежности является разработка новых конструктивных решений крепления лобовых частей обмотки статора: увели-

Таблица 3.3

Удельная повреждаемость двигателей

Двигатель	Удельная повреждаемость двигателей при мощности блока, МВт		
	150	200	300
Питательного насоса	0,034	0,085	0,102
Мельницы	0,017	0,087	0,125
Циркуляционного насоса	0,102	0,107	0,090

Таблица 3.4

Показатели надежности электродвигателей

Двигатель	Параметр интенсивности отказов λ		
	Обмотка статора		Прочие узлы
	без учета заклиновки	при ослаблении заклиновки	
ДАЗО 1914-10/12А	0,02	0,071	0,04
АТД-4000	0,046	0,121	0,065

чение числа бандажных колец, установление дополнительных распорок, цепная вязка.

В табл. 3.4 приведены показатели надежности двигателей высокого напряжения типов ДАЗО, АТД1 мощностью 4 МВт на девяти блочных электростанциях в период с 1968 по 1972 г. В рассматриваемый период капитальные ремонты двигателей проводились на этих станциях через каждые 2 года и наибольшее количество отказов приходилось на статорную обмотку.

Анализ опыта эксплуатации крупных электрических машин высокого напряжения показал, что состояние креплений обмоток в пазах и особенно в лобовых частях на выходе из пазов неудовлетворительное. Изоляция и статорные обмотки с МКИ в целом являются самым уязвимым узлом двигателя высокого напряжения.

Глава четвертая

ИЗОЛЯЦИЯ, ИЗГОТОВЛЯЕМАЯ МЕТОДОМ ВАКУУМ-НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ ПРОПИТКИ

4.1. Изоляция «Монолит»

Микалентная компаундированная изоляция имеет малую механическую прочность, особенно при рабочих температурах. Битумное связующее, применяемое в МКИ, является термопластичным веществом и размягчается при нагревании, изоляция вспухает, и в ней образуются газовые включения. Поэтому при разработке новой изоляции термопластичный битум был заменен терморезистивными полиэфирными и эпоксидными составами. В настоящее время все крупные зарубежные фирмы изготавливают генераторы с изоляцией на терморезистивных связующих.

Одной из первых терморезистивных изоляций, появившихся в СССР, была изоляция «Монолит», произведенная по технологии вакуум-нагнетательной пропитки эпоксидным компаундом обмотки, изолированной сухими стеклослюдинитовыми лентами. Технологический процесс изготовления изоляции «Монолит» заключается в следующем.

На стержни генератора механизированным способом наносят определенное количество слоев сухой стеклослюдинитовой ленты с содержанием подклеивающего вещества в пределах 3—4 %, а поверх изоляции — фторопластовую пленку. Изолированные стержни в пазовой части помещают в пресс-планки, фиксирующие размер, и укладывают стопкой таким образом, чтобы лобовые части плотно прилегали одна к другой. Этот пакет стержней фиксируется в нескольких местах бандажом. Затем пакет подвергают сушке в термостате при температуре 100 °С в течение нескольких часов. Высушенный пакет помещают в специально склеенный из вакуумной резины мешок (рис. 4.1). Мешок герметизируется, и к одному из имеющихся штуцеров подключается вакуумный

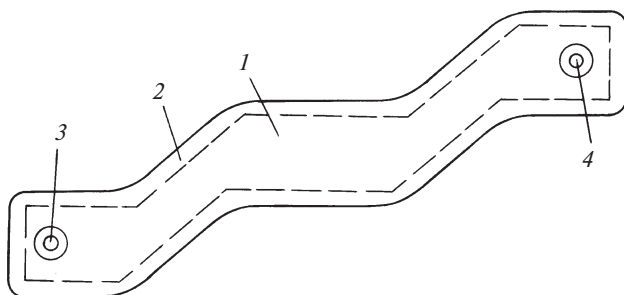


Рис. 4.1. Оснастка для пропитки по технологии «Монолит»:

1 — пакет стержней; 2 — резиновый мешок; 3 — штуцер для вакуума; 4 — штуцер для компаунда

насос. Проводится вакуумная сушка изоляции стержней в течение 2—3 ч при остаточном давлении $(0,13 \div 0,26)10^2$ Па, затем через другой штуцер под вакуумом подается расчетное количество приготовленного эпоксидного компаунда.

Мешок с пакетом помещают в тележку котла, закатывают ее в котел, который заполняется разогретой до температуры 70—80 °С горячей водой. Создается избыточное давление $1,5 \div 2,0$ МПа, температуру в котле поднимают до 120 °С и выдерживают 10—12 ч. Затем пакет извлекают из котла и помещают в термостат при температуре 150 ± 5 °С в течение 10—12 ч. В связи с тем что резиновый мешок был одноразового использования, его заменили на пропиточную коробку из тонких стальных листов.

Вначале такая конструкция применялась только на пазовые части пакета (рис. 4.2), а затем и на весь пакет (рис. 4.3).

Применение технологии отверждения эпоксидного компаунда под давлением обеспечивало высокие электрофизические характеристики готовой изоляции, в которой полностью устранялись воздушные включения и из которой исключалось вытекание пропиточного компаунда во время термообработки. Существенным недостатком являлись трудности при разборке готового пакета

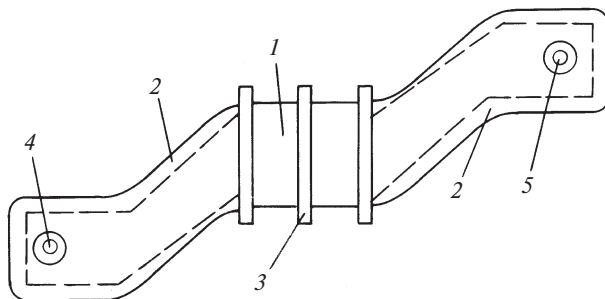


Рис. 4.2. Оснастка для пропитки:

1 — пакет стержней; 2 — резиновый мешок; 3 — герметичный короб с эластичными стенками, передающими давление; 4 — штуцер для вакуума; 5 — штуцер для компаунда

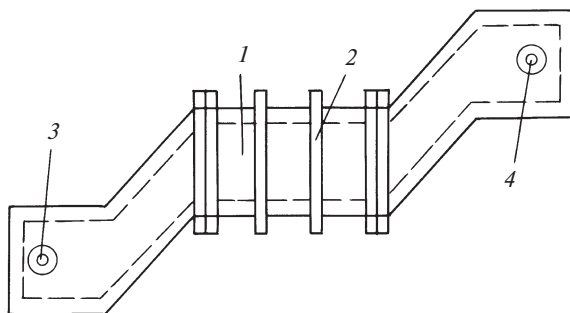


Рис. 4.3. Оснастка для пропитки:

1 — пакет стержней; 2 — полностью металлическая форма с эластичными стенками из листового железа; 3 — штуцер для вакуума; 4 — штуцер для компаунда

стержней и чистка оснастки, так как после отверждения пакет был полностью «замоноличен» излишками отвержденного компаунда.

При изготовлении изоляции «Монолит» не выделяется токсичных веществ, так как пропитка и запекание изоляции производятся в ограниченном объеме, а при запекании пропиточный состав не вытекает из изоляции. Пропитка может проводиться компаундом, приготавливаемым непрерывно во время проведения этого процесса и подаваемым в изоляцию с заданной скоростью. Поэтому для изоляции «Монолит» могут быть использованы компаунды с относительно малым сроком жизни. Поскольку изоляция пропитывается в ограниченном объеме, то требуется такое количество компаунда, которое необходимо для заполнения пор в изоляции. Для изоляции «Монолит» применяется пропиточный компаунд, состоящий из эпоксидной смолы и отвердителя ангидридного типа, и стеклослюдинитовая лента в качестве материала основного диэлектрического барьера.

На рис. 4.4 приведены кривые распределения значений электрической прочности макетов с микалентной компаундированной изоляцией и изоляции «Монолит», на рис. 4.5 — зависимость пробивного напряжения изоляции «Монолит» от толщины.

Электрическая прочность определялась в трансформаторном масле при температуре 20 °С при плавном подъеме напряжения со скоростью 2 кВ/с. Испытывалось по 20 макетов с изоляцией каждого типа, длина электрода составляла 200 мм.

Данные приведенные на рис. 4.4 и 4.5, показывают, что изоляция «Монолит» обладает более высокой электрической прочностью $E_{пр}$, чем микалентная компаундированная изоляция: при толщине изоляции 4—5 мм $E_{пр}$ изоляции «Монолит» в 2 раза превышает $E_{пр}$ микалентной изоляции. Изоляция «Монолит» более однородна по значениям электрической прочности.

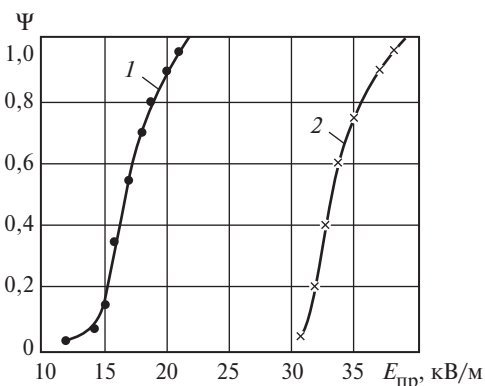


Рис. 4.4. Кривые распределения электрической прочности микалентной компаундированной изоляции (кривая 1) и изоляции «Монолит» (кривая 2)

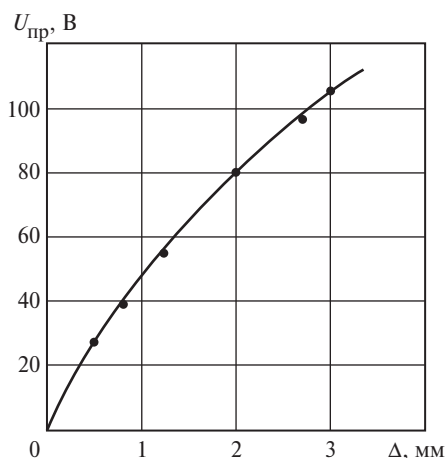


Рис. 4.5. Зависимость пробивного напряжения изоляции «Монолит» от толщины

Пределы разброса, соответствующие 99,7 % вероятности пробоя, для изоляции «Монолит» в 3 раза меньше, чем для микалентной. При испытании стержней гидрогенератора типа ВГС-700 и синхронных компенсаторов КСВ-80000 и КСВ-50000 со стеклослюдинитовой изоляцией было получено, что пробивное напряжение этих стержней превышает 100—105 кВ при толщине изоляции 4—4,1 мм на сторону.

Длительная электрическая прочность определялась на макетах с толщиной изоляции 3 мм по двум методикам: при действии возрастающего ступенями напряжения и при неизменном напряжении. В первом случае на макеты подавалось напряжение 10 кВ, затем оно повышалось ступенями по 2 кВ с выдержкой на каждой ступени в течение 1 ч до пробоя изоляции. За пробивное принималось напряжение ступени, на которой произошел пробой. При испытании неизменным напряжением на макеты подавались напряжения 35; 30 или 25 кВ и образцы выдерживались при заданном напряжении до пробоя.

Одновременно при испытании нарастающим напряжением и при неизменном напряжением испытывалось по 20 макетов. На рис. 4.6 приведены кривые жизни изоляции «Монолит» и МКИ, построенные по значениям пробивного напряжения или времени жизни, соответствующим 50 %-ным значениям этих характеристик.

На рис. 4.7 даны кривые распределения значений длительной электрической прочности изоляции «Монолит» и МКИ. Изоляция «Монолит» имеет меньший

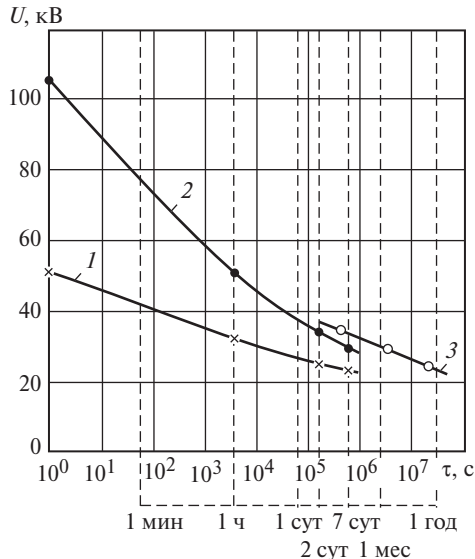


Рис. 4.6. Кривые жизни микалентной компаундированной изоляции (кривая 1) и изоляции «Монолит» (кривые 2, 3):

1, 2 — испытание нарастающим напряжением; 3 — испытание неизменным напряжением

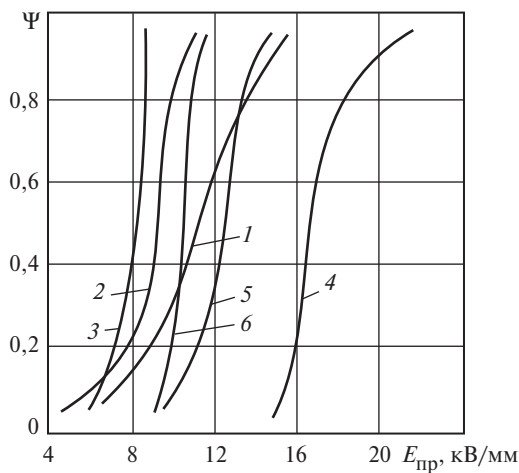


Рис. 4.7. Длительная электрическая прочность микалентной компаундированной изоляции (кривые 1, 2, 3) и изоляции «Монолит» (кривые 4, 5, 6). Испытание при ступенчатом подъеме напряжения:

1, 4 — часовая прочность; 2, 5 — двухсуточная прочность; 3, 6 — недельная прочность

разброс экспериментальных данных при всех выдержках времени на ступени напряжения, чем микалентная изоляция, что также характеризует однородность свойств стеклослюдинитовой изоляции. Значения длительной электрической прочности при испытании с недельной выдержкой на ступени U изоляции «Монолит» более высокие, чем соответствующие значения МКИ при двухсуточной выдержке.

Тангенс угла диэлектрических потерь изоляции является характеристикой, показывающей степень ее технологической готовности и монолитности, так как применяемый для пропитки эпоксидный компаунд имеет малые диэлектрические потери при комнатной и повышенной температурах.

На рис. 4.8 приведены сравнительные значения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции «Монолит», МКИ, Termolastic и Micapal.

Результаты этих измерений показывают, что изоляция «Монолит» обладает малыми значениями $\operatorname{tg} \delta$ при комнатной и рабочей температурах. Циклические испытания стержней гидрогенератора, включающие нагрев в свободном состоянии до температуры 130°C и охлаждение до температуры 50°C , показали высокую стойкость изоляции «Монолит» к тепловым воздействиям: $\operatorname{tg} \delta$ изоляции после 10 циклов нагрева до температуры 130°C не изменился и остался равным $\operatorname{tg} \delta$ стержней до циклических испытаний.

Напряжение начальной ионизации макетов с изоляцией «Монолит» превышает в 4 раза соответствующие значения макетов с микалентной компаундированной изоляцией. Стержни синхронного компенсатора КСВ-80 с изоляцией

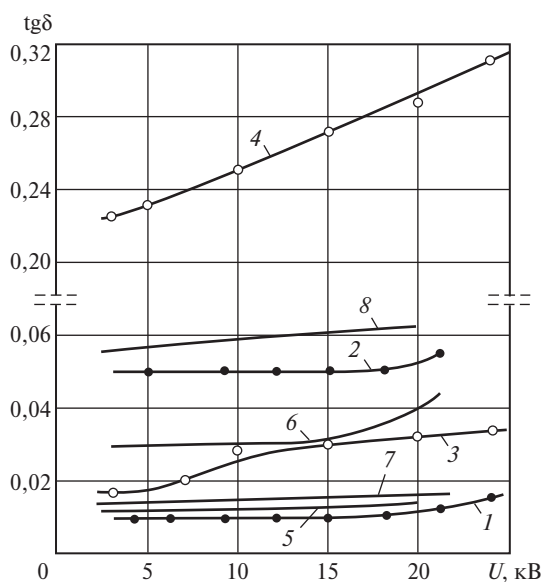


Рис 4.8. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ различных типов изоляции от напряжения:

1, 2 — изоляция «Монолит» при 20 и 130°C ; 3, 4 — изоляция МКИ при 20 и 100°C ; 5, 6 — изоляция Termolastic; 7, 8 — изоляция Micapal

«Монолит» имеют напряжение начальной ионизации, равное или превышающее 12—13 кВ (фазное напряжение этого компенсатора составляет 6,5 кВ). Такие же стержни с микалентной компаундированной изоляцией имеют начальное напряжение ионизации 3—4 кВ. Поэтому при эксплуатации ионизационные процессы в изоляции «Монолит» отсутствуют, т.е. срок службы такой изоляции превышает срок службы микалентной компаундированной изоляции.

Микалентная компаундированная изоляция имеет неудовлетворительные механические характеристики, поэтому пробой изоляции стержней генераторов во время изготовления на заводах и в эксплуатации в большей степени связаны с этой причиной. Вследствие малой жесткости стержней с микалентной изоляцией, особенно при рабочей температуре, изоляция может повреждаться из-за больших относительных деформаций при различных операциях, связанных с укладкой стержней в статор при их транспортировке, или во время эксплуатации при вибрационных и ударных нагрузках. Поэтому при разработке новой изоляции, большое внимание было уделено изучению механических характеристик изоляции.

Характеристики изоляции определялись на стержнях гидрогенератора мощностью 57 МВт напряжением 10,5 кВ. Стержни были выполнены из провода ПСД сечением 2,26×8 мм, сечение изолированного стержня составляло 17,5×54,2 мм, толщина изоляции — от 3,5 до 4,0 мм на сторону.

Определялись критический прогиб изоляции и жесткость стержней. Под критическим прогибом изоляции подразумевается значение прогиба стержня, при котором его пробивное напряжение уменьшалось до 24 кВ. Определение критического прогиба проводилось на отрезках пазовой части стержня длиной по 400 мм при температуре 20 °С и при рабочих температурах: для стеклослюдинитовой изоляции 130 °С и для микалентной компаундированной 105 °С. Отрезок стержня укладывали на опоры полуцилиндрической формы, расстояние между которыми составляло 225 мм, радиус закругления опор — 10 мм. Изгибающее усилие прикладывали к средней части макета. При каждом изменении прогиба на 0,5 мм к стержню прикладывали напряжение 24 кВ в течение 1 мин. Образец при помощи пресса прогибали до тех пор, пока пробивное напряжение становилось равным или меньше 24 кВ. По результатам этих испытаний рассчитывались жесткость стержней EJ и относительная деформация при критическом прогибе ε :

$$EJ = \frac{Pl^3}{48\delta}; \quad \varepsilon = \frac{6h\delta}{l^2},$$

где P — изгибающая сила, Н; l — расстояние между опорами, м; δ — прогиб, м; h — ширина макета, м.

Опыты проводились на 10 образцах изолированных стержней при каждом значении испытательной температуры.

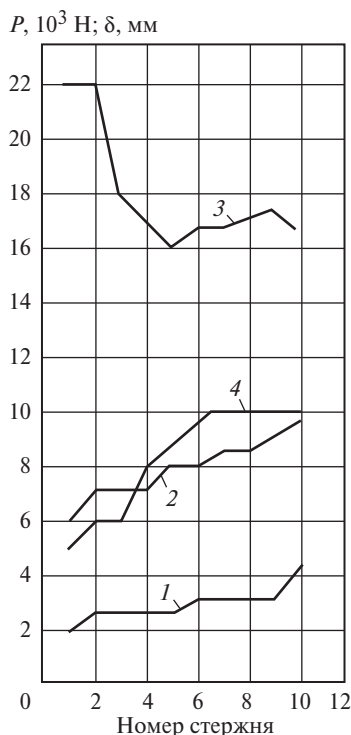


Рис. 4.9. Пределные прогибы (кривые 1, 2) и соответствующие им значения изгибающего усилия (кривые 3, 4) при температуре 20 °С:

1, 3 — изоляция «Монолит»; 2, 4 — микалентная компаундированная изоляция

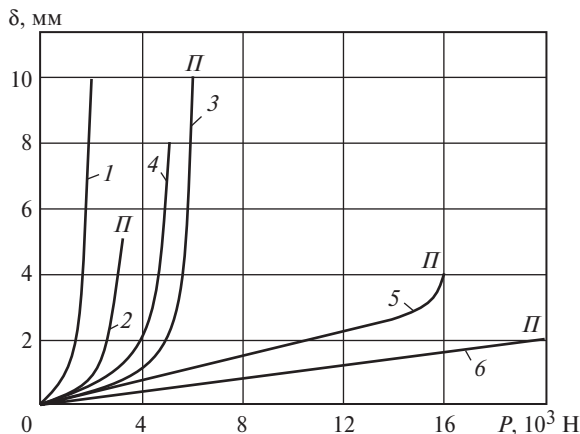


Рис. 4.10. Зависимость прогиба от изгибающего усилия для стержней при температуре 20 °С:

1 — стержни после удаления микалентной изоляции; 2, 3 — стержни с микалентной изоляцией; 4 — стержни после удаления изоляции, «Монолит»; 5, 6 — стержни с изоляцией «Монолит»; П — пробой изоляции

На рис. 4.9 приведены диаграммы, показывающие значения предельного прогиба при температуре 20 °С и соответствующих им изгибающих усилий для стержней с изоляцией «Монолит» и с микалентной компаундированной изоляцией. Значение критического прогиба стержней с изоляцией «Монолит» (при температуре 20 °С) составляло 2—4 мм, значение относительной критической деформации при этом изменялось от $6 \cdot 10^{-3}$ до $12 \cdot 10^{-3}$. Стержни с МКИ допускали при таких испытаниях деформацию от 5 до 10 мм. Из 10 испытанных стержней с изоляцией «Монолит» значения критического прогиба для восьми образцов составляли 2,5—3,0 мм, т.е. относительная деформация при критическом прогибе для большинства образцов находилась в пределах $(7,5 \div 9,0) 10^{-3}$ отн. ед. Для изоляции «Монолит» какого-либо соответствия между значениями критического прогиба и изгибающего усилия при этих испытаниях не было отмечено. Для стержней с МКИ наблюдалась определенная зависимость разрушающего усилия от критического прогиба: при росте критического прогиба изгибающее усилие также увеличивалось.

На рис. 4.10 приведены зависимости прогиба δ при температуре 20 °С от изгибающего усилия P для изолированных стержней и для сравнения аналогич-

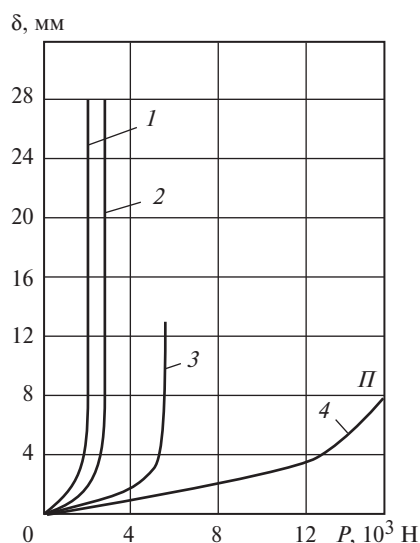
ные кривые для тех же стержней после удаления с них изоляции. Для каждого типа изоляции приведено по три кривых: зависимости $\delta = f(P)$ для медного стержня и для изолированных стержней, которые показали минимальное и максимальное значения критического прогиба. Результаты, приведенные на рис. 4.9 и 4.10, показывают, что при данных условиях испытаний разрушающие усилия для стержней с микалентной компаундированной изоляцией лежат в пределах 6,0—9,5 кН, для стержней с изоляцией «Монолит» — в пределах 16—22 кН. Хотя стержни с изоляцией «Монолит» допускают меньшие деформации, для нарушения целостности их изоляции требуются значительно большие усилия. Те усилия, при которых МКИ разрушается в результате большой деформации стержней, являются безвредными для стержней с изоляцией «Монолит». Кривая зависимости прогиба от изгибающего усилия для стержней с микалентной изоляцией подобна кривой $\delta = f(P)$ для медного стержня и в значительной степени повторяет ее. Для стержней с изоляцией «Монолит» характер зависимости прогиба от изгибающего усилия определяется термореактивной изоляцией. Полученные данные показывают также, что стержни с МКИ допускают при температуре 20 °С относительно малую деформацию, при которой происходит излом изоляции, поэтому при различного вида операциях с ними (транспортировка, укладка на раму для компаундирования и т.п.) должны соблюдаться меры предосторожности, чтобы исключить деформации, которые могут привести к повреждению изоляции стержней. Для стержней с изоляцией «Монолит» при температуре 130 °С были получены критические прогибы в пределах 6—7 мм и разрушающие изгибающие усилия в пределах 14,5—21,0 кН.

Стержни с МКИ при температуре 105 °С допускали прогиб до 30 мм без пробоя изоляции, при этом изгибающие усилия лежали в пределах 3,75—4,0 кН. На рис. 4.11 приведены кривые зависимости прогиба от изгибающего усилия для стержней с МКИ (при 105 °С) и стеклослюдинитовой изоляцией (при 130 °С), а также для тех же стержней после удаления с них изоляции.

Компаундированный стержень без изоляции имеет малую жесткость и при незначительных усилиях деформируется в широких пределах. Стержни, с которых была удалена термореактивная изоляция, сохраняют высокое значение жесткости, и для их деформации тре-

Рис. 4.11. Зависимость прогиба от изгибающего усилия для стержней с микалентной изоляцией при 105° С и с изоляцией «Монолит» при температуре 130 °С:

1 — стержень после удаления микалентной изоляции; 2 — стержень с микалентной изоляцией; 3 — стержень после удаления изоляции «Монолит»; 4 — стержень с изоляцией «Монолит»; П — пробой изоляции



буются значительные усилия. Стержни с термореактивной изоляцией при температуре 130 °С допускают в 2—3 раза большие деформации, чем при температуре 20 °С.

На рис. 4.12 и 4.13 приведены кривые зависимости жесткости стержней от прогиба при температурах 20 и 130 °С. Эти кривые показывают, что стержни с изоляцией «Монолит» имеют при температуре 20 °С в 2—4 раза, а при рабочей температуре в 3—6 раз большую жесткость, чем стержни с микалентной компаундированной изоляцией.

Критическая деформация и жесткость стержней исследовались на холоде при температуре –50 °С. Для этой цели отрезки стержней помещали в хладокамеру и выдерживали в ней при температуре –50 °С в течение 9 ч. До проведения испытаний стержни в течение пяти циклов, которые состояли из пребывания в хладокамере при температуре –50 °С в течение 9 ч и при температуре 15—18 °С в течение 15 ч. Критический прогиб стержней определялся после извлечения стержней из хладокамеры при температуре окружающего воздуха 15—18 °С.

Испытание каждого стержня продолжалось 10—12 мин, за это время температура верхних слоев изоляции повышалась, при этом поверхность стержней покрывалась слоем инея. Поскольку стержни с микалентной компаундированной и термореактивной изоляцией испытывались в одних и тех же условиях, полученные данные характеризуют относительную холодостойкость обоих типов изоляции. Критические прогибы стержней с изоляцией «Монолит» находились в пределах 7,0—9,5 мм. При опытах было отмечено явление постепен-

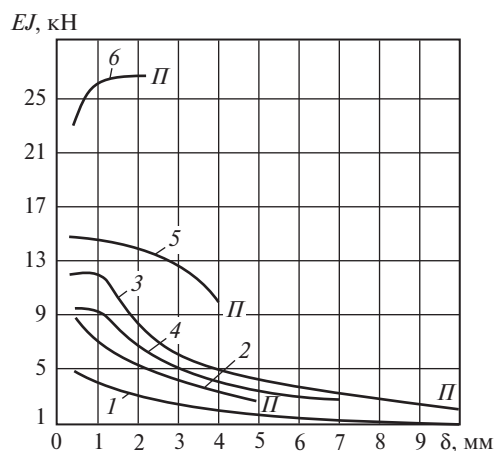


Рис. 4.12. Жесткость стержней при температуре 20 °С:

1 — стержни после удаления микалентной изоляции; 2, 3 — стержни с микалентной изоляцией; 4 — стержни после удаления изоляции «Монолит»; 5, 6 — стержни с изоляцией «Монолит»; П — пробой изоляции

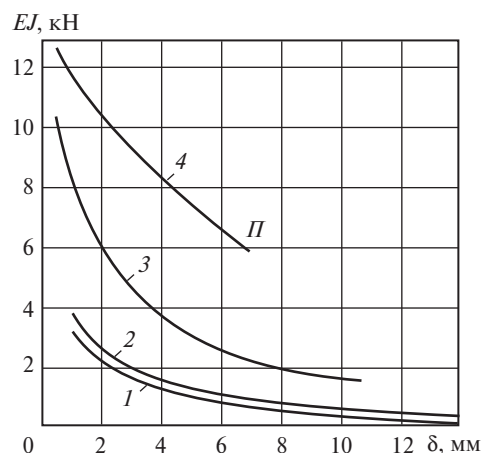


Рис. 4.13. Жесткость стержней с микалентной изоляцией при 105 °С и с изоляцией «Монолит» при температуре 130 °С:

1 — стержень после удаления микалентной изоляции; 2 — стержень с микалентной изоляцией; 3 — стержень после удаления изоляции «Монолит»; 4 — стержень с изоляцией «Монолит»; П — пробой изоляции

ного излома изоляции: из восьми испытанных образцов только два получили пробой при нарастающей изгибающей нагрузке, при этом прогиб составил 7 мм для обоих образцов. Для остальных шести образцов было получено сначала увеличение изгибающего усилия до 25 кН при достижении стрелы прогиба 7 мм, затем при дальнейшем увеличении стрелы прогиба изгибающее усилие уменьшалось до 15 кН, и при стреле прогиба 6,0—9,5 мм наступал пробой изоляции.

При испытании стержней с микалентной изоляцией было получено, что изгибающее усилие растет при увеличении стрелы прогиба до 3 мм, при дальнейшем увеличении стрелы прогиба установившиеся значения изгибающего усилия практически не изменяются и составляют 9,5—10,0 кН. Критические прогибы для МКИ составили 5 мм (один образец), 15 мм (два образца) и 19 мм (два образца).

На рис. 4.14 приведены кривые зависимости прогиба от изгибающего усилия для стержней с МКИ и термореактивной изоляцией. Для каждого типа изоляции приведены кривые $\delta = f(P)$ для двух образцов, для которых были получены максимальные и минимальные значения критического прогиба. При низких температурах стержни с изоляцией «Монолит» допускают критические деформации в 2,5—3,5 раза более высокие, чем при температуре 20 °С.

На рис. 4.15 приведены кривые зависимости жесткости стержней при температуре –50 °С от их прогиба. При стреле прогиба до 1 мм наблюдалось повышение жесткости стержней с термореактивной изоляцией, затем, при дальнейшем увеличении стрелы прогиба, жесткость этих стержней уменьшалась. Для стержней с микалентной компаундированной изоляцией наблюдалось монотонное

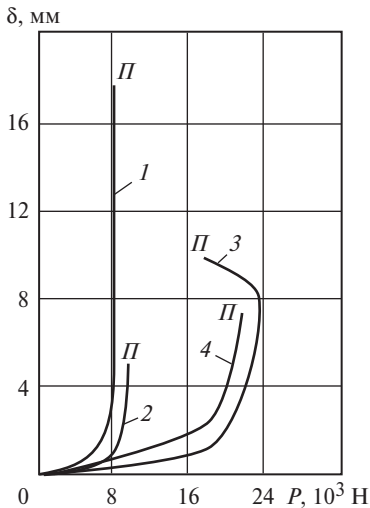


Рис. 4.14. Зависимость прогиба от изгибающего усилия для стержней при температуре –50 °С: 1, 2 — стержни с микалентной изоляцией; 3, 4 — стержни с изоляцией монолит; П — пробой изоляции

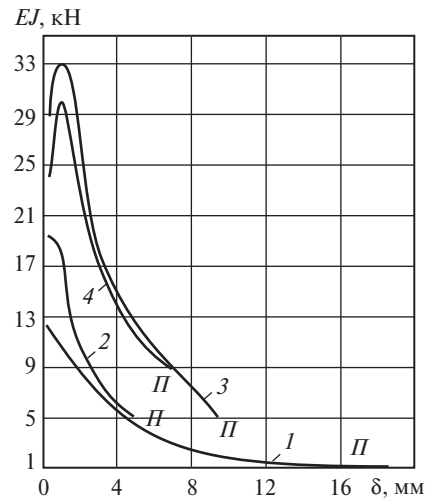


Рис. 4.15. Зависимость жесткости стержней при температуре –50 °С от прогиба:

1, 2 — стержни с микалентной изоляцией; 3, 4 — стержни с изоляцией «Монолит»; П — пробой изоляции

уменьшение жесткости при увеличении деформации. Так же, как и при комнатной температуре, при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ видно, что для разрушения изоляции «Монолит» необходимо приложить к стержням значительно бóльшие (в 2,0—2,5 раза) усилия, чем для разрушения микалентной компаундированной изоляции. При предельных для микалентной компаундированной изоляции изгибающих усилиях деформации стержней с изоляцией «Монолит» малы и практически безвредны для этой изоляции.

Проведенные испытания по определению модуля упругости изоляции показали, что в широком диапазоне деформаций зависимость между механическим напряжением (или, в первом приближении, изгибающим усилием) и деформацией является нелинейной и определение модуля упругости изоляции в этом случае теряет смысл. При относительно малых деформациях (0,5—1,0 мм) эта зависимость близка к линейной. Модуль упругости изоляции был определен при деформации стержня, равной 0,5 мм. Модуль упругости изоляции «Монолит» при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ составлял $(1,1 \div 2,5)10^{10}\text{ Н/м}^2$, при температуре $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ он был равен $(0,42 \div 0,63)10^{10}\text{ Н/м}^2$. У микалентной изоляции при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ модуль упругости равен $(0,42 \div 1,2)10^{10}\text{ Н/м}^2$.

Важное значение имеет напряжение сдвига изоляции. Испытания изоляции на сдвиг относительно медного стержня проводились на отрезках стержней с изоляцией «Монолит» и МКИ. С отрезка стержня снимали изоляцию, за исключением поясков шириной по 10, 15, 20, 25 и 30 мм. Стержень вставляли в специальный паз, и на гидравлическом прессе определяли усилие сдвига этих поясков изоляции. Не удалось получить значения напряжения сдвига изоляции «Монолит» по меди: во время испытаний происходил сдвиг изоляции по слоям. Для МКИ были получены значения сдвига изоляции по меди.

На рис. 4.16 приведены зависимости напряжения сдвига по слоям изоляции «Монолит» при температуре 20 и $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ от площади испытуемого пояска изоляции. При температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ напряжение сдвига изоляции «Монолит» по меди

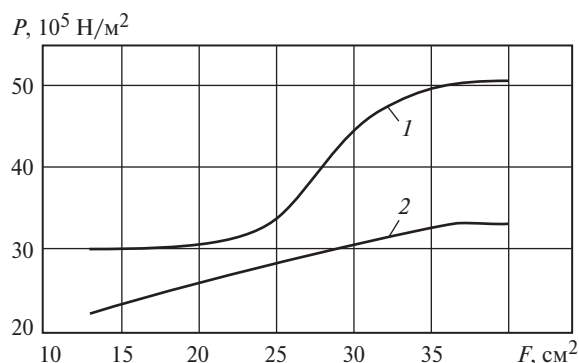


Рис. 4.16. Зависимость напряжения при сдвиге изоляции «Монолит» от площади испытуемого пояска: 1 — при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — при температуре $130\text{ }^{\circ}\text{C}$

стержня превышает $52 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, при этом напряжении происходит сдвиг изоляции по слоям. При рабочей температуре напряжение сдвига изоляции «Монолит» по меди превышало $32 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ (также происходит сдвиг изоляции по меди). Напряжение сдвига МКИ по меди при температуре 20°C составляло $(2,0 \div 3,5)10^5 \text{ Н/м}^2$, а при температуре 105°C микалентная изоляция сдвигалась как по меди, так и по слоям изоляции почти без усилий.

Таким образом, изоляция «Монолит» допускает меньшие деформации при изгибе при комнатной и рабочей температуре, чем МКИ. Поэтому укладка стержней с термореактивной изоляцией в генератор должна проводиться без изгиба стержней.

Стержни с изоляцией «Монолит» имеют в 2—4 раза большую жесткость, чем стержни с микалентной компаундированной изоляцией. Поэтому для разрушения микалентной изоляции стержней требуются значительно меньшие усилия, чем для термореактивной изоляции. Изгибающие усилия, при которых микалентная компаундированная изоляция стержней разрушается, стержни с изоляцией «Монолит» выдерживают без повреждения изоляции.

Исследования электрических и механических свойств изоляции «Монолит» на макетах и стержнях генераторов показали, что эта изоляция имеет значительно более высокую электрическую и механическую прочность, меньшие значения $\text{tg } \delta$ по сравнению с микалентной компаундированной изоляцией, обладает высокой короностойкостью, вибростойкостью и стойкостью к ударным нагрузкам, высокой маслостойкостью, она устойчива к действию повышенных температур. Поэтому изоляция «Монолит» была рекомендована для стержней генераторов и синхронных компенсаторов.

Эта технология изготовления изоляции была внедрена в СССР только на заводе «Уралэлектротяжмаш». С этим видом изоляции завод выпустил большое количество синхронных компенсаторов мощностью 50—150 МВт и гидрогенераторов мощностью 27—300 МВт, в том числе для Асуанской ГЭС, Нурекской ГЭС и др.

4.2. Изоляция «Монолит-2»

4.2.1. Основные принципы изготовления изоляции «Монолит-2»

Изоляция «Монолит» обеспечила высокие характеристики термореактивной изоляции для стержневых обмоток гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Одновременно появилась необходимость создания высоконадежной изоляции с высокими электрическими и механическими свойствами для электрических машин высокого напряжения и стержневых обмоток турбогенераторов.

По разработанному процессу изготовления изоляции «Монолит» оказалось невозможным изготовление катушечных обмоток и стержневых обмоток турбогенераторов, так как в этих случаях пропиточная коробка для изготовления, например, стержневых обмоток турбогенераторов становилась сложной по конфигурации. Стержни невозможно было уложить стопкой, как стержни гидроге-

нератора, чтобы обеспечить прилегание лобовых частей, в связи с особенностью конфигурации стержней турбогенератора. Поэтому были начаты работы по разработке изоляции типа «Монолит» для катушечных и стержневых обмоток электрических машин. Целью данной разработки ставилось создание изоляции, которая по электрическим и механическим характеристикам была бы на уровне изоляции «Монолит», при этом технологический процесс изготовления изоляции необходимо было упростить и отказаться от воды как от опрессовочной среды.

При разработке исходили из того, что имеющийся пропиточный состав легко пропитывал изоляцию из сухих лент. Необходимо было решить задачу: как удержать его в изоляции, чтобы обеспечить высокие характеристики. Были проделаны опыты, при которых разогретые до 70—80 °С макеты, представляющие собой медные шины 6×30×1000 мм, изолированные сухими слюдосодержащими лентами, помещали в вертикальный пропиточный котел, вакуумировали и под вакуумом котел заполняли разогретым до 70—80 °С компаундом, применяемым для изоляции «Монолит». Затем при помощи шестеренчатого насоса создавали давление компаундом в котле 0,8 МПа в течение 3 ч. Далее пропиточный компаунд сливали, и в котел подавали азот давлением 0,4—0,5 МПа для предотвращения вытекания компаунда из изоляции. Температура поднималась в котле до 150 °С. При давлении азота и такой температуре изоляция макетов полностью выпекалась в течение 24 ч.

Полученная таким образом изоляция толщиной 2 мм обладала довольно высокими электрическими характеристиками, но они были ниже, чем у изоляции «Монолит». На рис. 4.17 приведены значения электрической прочности изоляции макетов, полученной по упрощенному технологическому процессу. Эта изоляция — усовершенствованный вариант изоляции «Монолит», впоследствии получила название «Монолит-2». Несмотря на то, что характеристики изоляции «Монолит-2» уступали характеристикам изоляции «Монолит» примерно на 15 %, они оказались в 1,5 раза выше, чем у микалентной компаундированной.

В НИИ завода «Сибэлектротяжмаш» была спроектирована и изготовлена опытная установка по пропитке статоров машин высокого напряжения. На одном из изготовленных двигателей было определено пробивное напряжение изоляции катушек, значение которого превосходило пробивное напряжение МКИ. Поэтому двигатели после заводских испытаний были направлены в эксплуатацию.

Опробование технологии изготовления изоляции «Монолит-2» выявило следующие недостатки:

- пропиточный компаунд на основе смолы ЭД-6, где в качестве отвердителя применялся малеиновый ангидрид, оказался очень токсичным, и персоналу работать с таким компаундом при непосредственном контакте было невозможно без защитных средств (респираторов, противогазов и т.п.), что существенно затрудняло процесс внедрения изоляции;

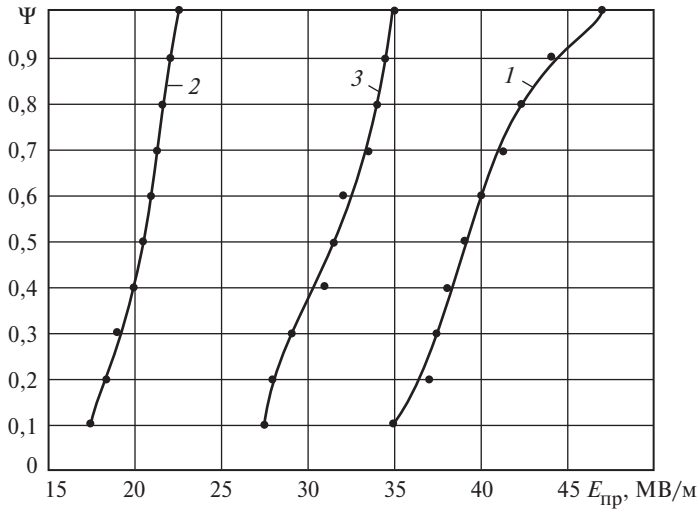


Рис. 4.17. Кривые распределения значений электрической прочности макетов с изоляцией «Монолит» (кривая 1), микалентной компаундированной изоляцией (кривая 2) и «Монолит-2» (кривая 3)

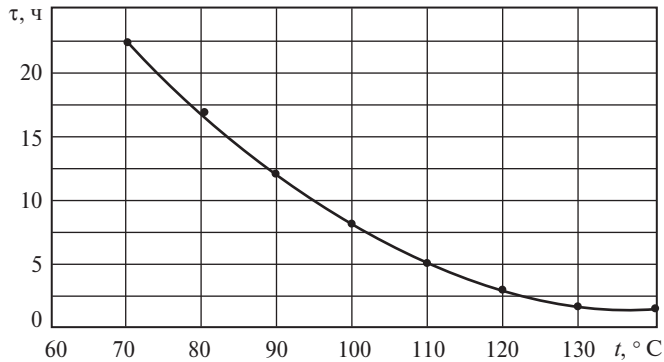


Рис. 4.18. Зависимость срока жизни эпоксидного компаунда от температуры

- применяемый компаунд имел очень ограниченный срок жизни (рис. 4.18), его вязкость после двух-трех пропиток резко нарастала (рис. 4.19), после чего его сливали и готовили новый компаунд;
- создавать гидростатическое давление таким пропиточным компаундом в производственных масштабах нетехнологично, так как вязкость его быстро нарастала и приходилось часто промывать трубопроводы и шестеренчатые насосы, осуществляющие подачу и создание давления.

Анализ образцов компаундов показал, что ведущие зарубежные фирмы используют для аналогичных процессов жидкие диановые смолы с жидкими или плавящимися при невысоких температурах отвердителями. К таким смолам можно было отнести смолу CY-205 Araldit фирмы Ciba-geigy (Швейцария), DER-330

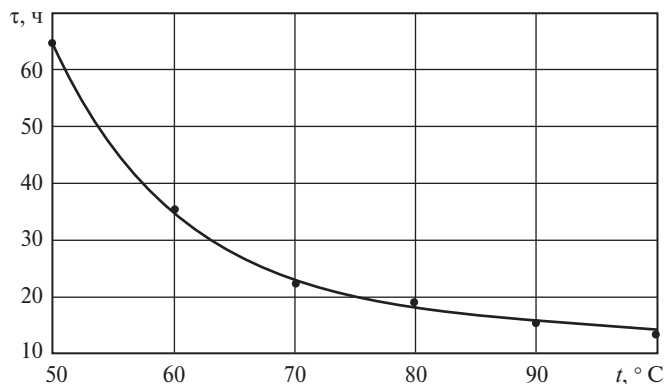
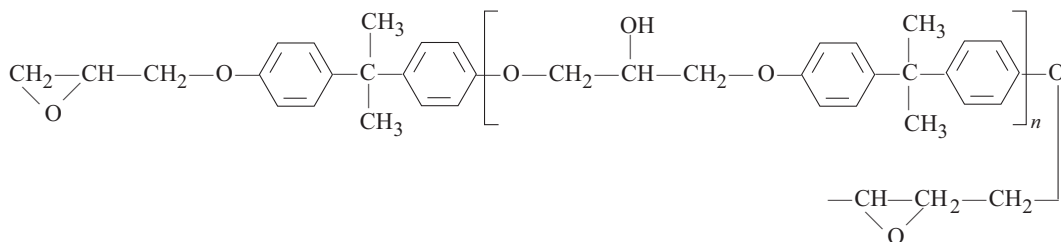


Рис. 4.19. Зависимость вязкости эпоксидного компаунда от температуры по вискозиметру ВЗ-4

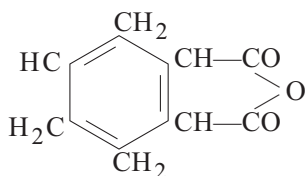
фирмы Day Chemical (США), MER-200 фирмы Hitachi Chemical (Япония) и соответствующие отвердители. Компаунды на основе этих смол и отвердителей обладают низкой вязкостью при температурах 40—60 °С и большой жизнеспособностью, а также длительным сроком хранения при комнатной температуре. В отличие от других жидких смол (например, фенольных, полиэфирных, акриловых и др.) отверждаемые подобным образом эпоксидные смолы обладают рядом преимуществ:

- низкой вязкостью. Смолы и отвердители образуют низковязкие подвергаемые переработке композиции;
- легкостью отверждения. Эпоксидные смолы легко отверждаются при температуре 150 °С в зависимости от выбранного отвердителя;
- малой усадкой. Это одно из самых больших преимуществ, в процессе отверждения компаунд имеет незначительную усадку;
- высокой адгезионной прочностью;
- высокими механическими характеристиками;
- высокими электрофизическими свойствами;
- хорошей химической стойкостью и водостойкостью.

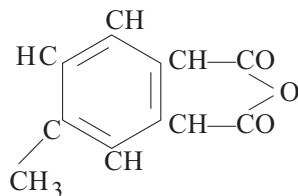
Поэтому при разработке пропиточного компаунда для изоляции, изготавливаемой методом вакуум-нагнетательной пропитки, за основу была принята эпоксидная смола дианового типа:



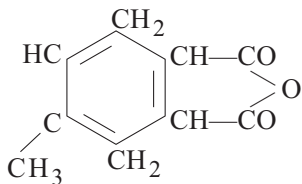
шие электрофизические и механические свойства при повышенной температуре. Большинство ангидридов требуют нагрева для отверждения, при этом максимальные свойства зависят от дополнительной термообработки при температуре 150 °С или выше. Поэтому для пропиточного компаунда была опробована разработанная УкрНИИВМ низковязкая смола ЭД-5Н (в настоящее время ЭД-22), а в качестве отвердителя — гексагидрофталевый, метилэндиковый, метилтетрагидрофталевый и изометилтетрагидрофталевый ангидриды:



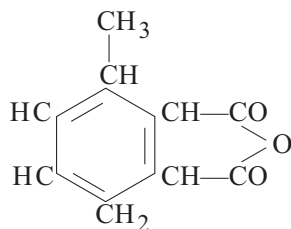
Гексагидрофталевый
ангидрид (ГГФА)



Метилэндиковый
ангидрид (МЭА)



Метилтетрагидрофталевый
ангидрид (МТГФА)



Изометилтетрагидрофталевый
ангидрид (ИМТГФА)

Компаунды с применением этих ангидридов обладали малой вязкостью. Причем жидкие ангидриды МЭА и ИМТГФА легко смешивались с эпоксидными смолами, поэтому были более удобны в переработке, чем кристаллические ангидриды МТГФА и ГГФА, которые обладали большей гигроскопичностью и требовали очень тщательной упаковки.

Проведенные испытания этих компаундов на срок жизни при комнатной температуре показали, что компаунд, состоящий из ЭД-5Н и МТГФА после 20 сут хранения имел вязкость больше 60 с по ВЗ-4, в то время как остальные за это время имели вязкость меньше 40 с по ВЗ-4.

Использование в качестве отвердителя МЭА усложняло технологию переработки пропиточного компаунда, отверждение необходимо было вести при температурах 180—200 °С. Кроме того, отечественные сырьевые компоненты для производства МЭА отсутствовали. Поэтому для дальнейших исследований был использован компаунд, состоящий из смолы ЭД-5Н и отвердителя ИМТГФА, взятых в массовом соотношении 100:80. Этот компаунд обладал низкой вязкостью при сравнительно невысоких температурах. Результаты испытаний пока-

зали, что при температурах 60—80 °С компаунд имел вязкость 15—17 с по ВЗ-4, что должно было обеспечить хорошую пропитку изоляции. Этот компаунд получил наименование ПК-11. Проведенные испытания по измерению изменения вязкости в процессе хранения при температуре 40 °С и от времени хранения при комнатной температуре показали, что компаунд обладает низкой вязкостью и длительным сроком хранения.

Отвержденный пропиточный компаунд имеет высокие электрофизические и механические характеристики, которые приведены в табл. 4.1.

Таким образом, разработанный компаунд обладает достаточным сроком жизни при комнатной и повышенной температуре и низкой вязкостью при температуре 60 °С, достаточной для пропитки изоляции обмоток, изолированных сухими стеклослюдосодержащими лентами. Это давало возможность разработать технологию пропитки с многократным использованием пропиточного состава, в том случае если температура компаунда при пропитке будет не выше 60 °С. Дальнейшие испытания показали, что при применении низковязких имеющих длительную жизнеспособность компаундов опрессовка изоляции азотом после пропитки не дает никакого эффекта. Электрофизические характеристики, определенные на макетах с опрессовкой изоляции азотом и без нее, показали практически одинаковые результаты. Это позволило резко упростить технологический процесс, так как в этом случае термообработку изоляции стало воз-

Таблица 4.1

Характеристики отвержденного компаунда ПК-11

Характеристика	Единица измерения	Значение
Электрическая прочность образца толщиной 0,5 мм	кВ/мм	28—30
Значение $\operatorname{tg} \delta$:		
при 20 °С		0,003
при 130 °С		0,08
Диэлектрическая проницаемость ϵ :		
при 20 °С		3,5
при 130 °С		4,6
Удельное объемное сопротивление:	Ом · см	
при 20 °С		$1 \cdot 10^{16}$
при 130 °С		$1 \cdot 10^{13}$
Теплостойкость по Мартенсу	°С	110—115
Удельная ударная вязкость	Н · с/м ²	12—16
Предел прочности при растяжении при 20 °С	Н/м ²	850

можно проводить вне пропиточного котла в термостате, что позволило в несколько раз увеличить пропускную способность пропиточных котлов.

Как указывалось выше, основным недостатком разработанной технологии изготовления изоляции методом вакуум-нагнетательной пропитки являлась необходимость наличия пропиточных форм, повторяющих сложную конфигурацию обмоток, отверждение в форме под давлением пропиточного состава и последующая разборка форм с обмотками, залитыми излишками отвержденного компаунда.

Разработанный низковязкий компаунд благодаря его большому сроку жизни позволял принципиально изменить технологию пропитки и запекания изоляции обмоток и, как следствие, требования к оснастке и пропиточному оборудованию.

Таким образом, была поставлена цель создания технологии изготовления изоляции методом вакуум-нагнетательной пропитки — изоляции «Монолит-2». На рис. 4.20 приведена схема упрощенной технологической установки для пропитки изоляции по технологии «Монолит-2».

Технология пропитки изоляции состояла из следующих операций:

- разогрева пропиточного компаунда от комнатной температуры до температуры пропитки 60 °С;
- подачи под вакуумом пропиточного компаунда в предварительно отвакуумированную пропиточную емкость с обмотками;

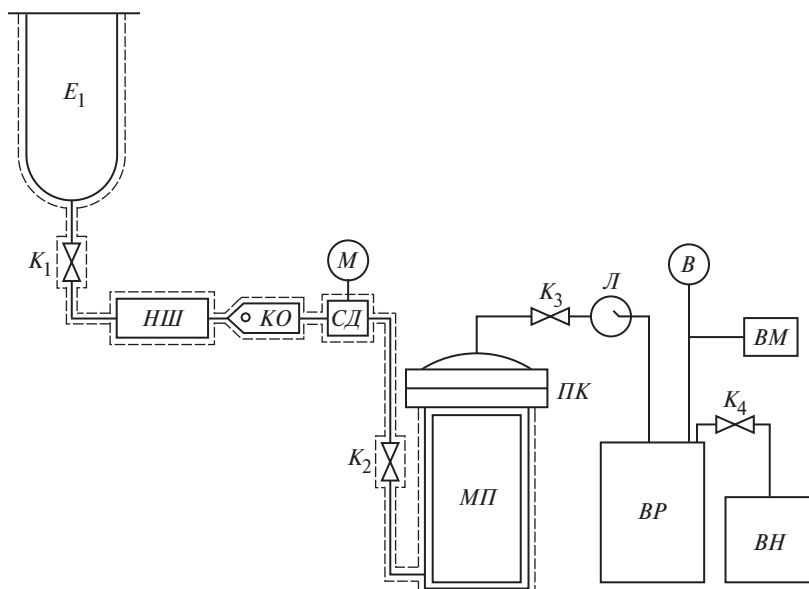


Рис. 4.20. Схема упрощенной технологической установки для пропитки изоляции по технологии «Монолит-2»:

E_1 — емкость с пропиточным компаундом; $НШ$ — шестеренчатый насос; $КО$ — обратный клапан; $СД$ — датчик давления; $М$ — манометр; $ПК$ — пропиточный котел; $МП$ — макеты для пропитки; $Л$ — ловушка стеклянная; $В$ — вакуумметр стрелочный; $ВМ$ — вакуумметр Мак-Леода; $ВР$ — вакуумный ресивер; $ВН$ — вакуумный насос; K_1 – K_4 — краны

- полного заполнения пропиточным составом емкости с обмотками;
- создания избыточного давления в емкости для пропитки и выдержки при этом давлении необходимое время;
- снятия давления и слива излишков компаунда;
- термообработки изоляции обмоток в свободном состоянии, или в пропиточной емкости, или в термостате.

Такая технология изготовления изоляции давала возможность многократного использования компаунда, в результате чего пропиточная емкость могла быть довольно простой формы, так как процесс отверждения проводился после слива пропиточного компаунда. После отверждения обмотки легко разбирались. Все это позволяло осуществлять пропитку обмоток любой сложной конфигурации и пропитку обмотанных статоров электродвигателей высокого напряжения.

Процесс изготовления изоляции стержневых и катушечных обмоток, представленных на рис. 4.21 и 4.22, можно разделить на четыре стадии, в ходе которых вязкость пропиточного компаунда под действием технологических режимов изменяется (рис. 4.23).

На первой стадии происходит разогрев пропиточного компаунда от комнатной температуры до температуры пропитки, при этом вязкость пропиточного состава снижается до 20—25 с по ВЗ-4.

На второй стадии пропитывают изоляцию при постоянной температуре, вязкость компаунда в этот период не изменяется. После пропитки компаунд сливают.

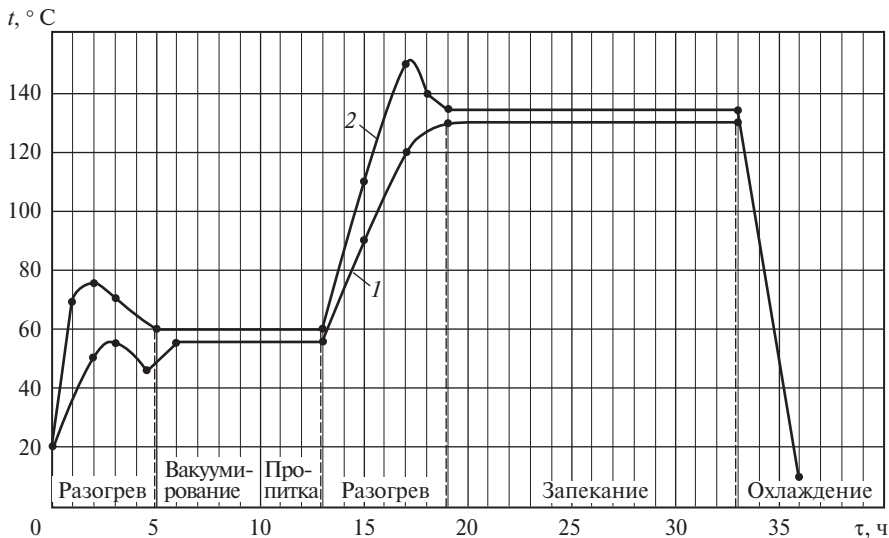


Рис. 4.21. Температурно-временной график изготовления изоляции стержней турбогенераторов:

1 — температура стержня; 2 — температура камеры

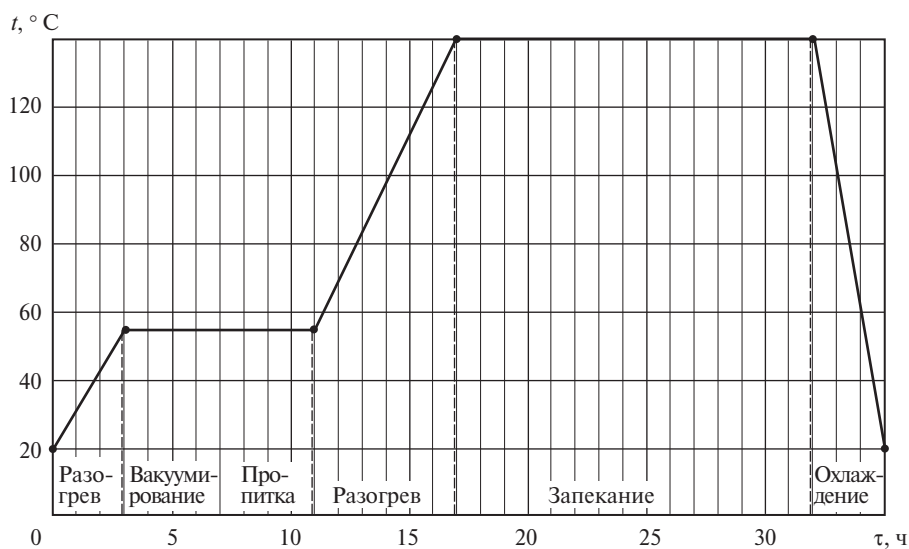


Рис. 4.22. Температурно-временной график изготовления статоров КЭМ с изоляцией «Монолит-2»

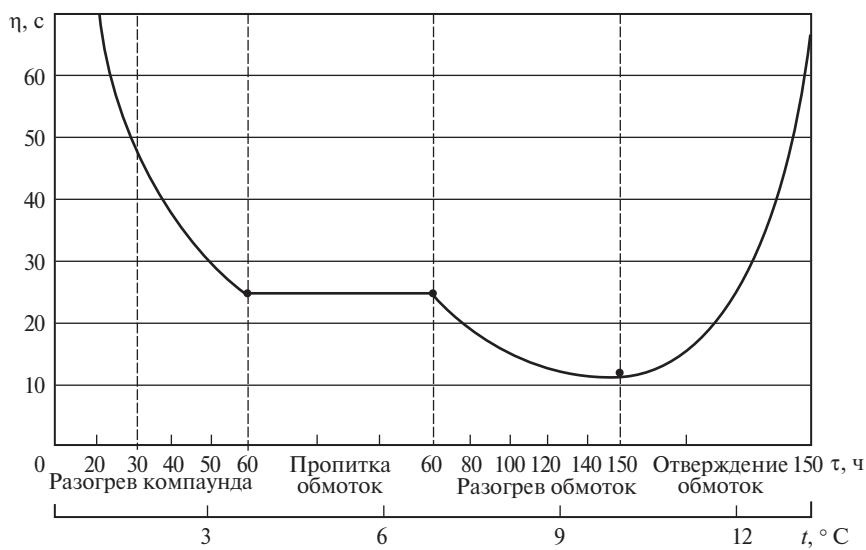


Рис. 4.23. Изменение вязкости компаунда в процессе технологических циклов изготовления изоляции

На третьей стадии происходит разогрев обмотки до температуры отверждения. Вязкость компаунда, вошедшего в изоляцию, снижается до 10—11 с по ВЗ-4.

На четвертой стадии происходит отверждение компаунда, входящего в изоляцию и его вязкость повышается от 10—11 с до твердого состояния.

Испытания изоляции, изготовленной по указанной технологии, показали, что после пропитки в момент слива компаунда и подъема температуры происходит вытекание пропиточного компаунда, вошедшего в изоляцию, вследствие снижения вязкости пропиточного состава. Вытекание пропиточного компаунда из изоляции уменьшало количество связующего в ней, образовывало пустоты, что вело к существенному снижению электрофизических характеристик готовой изоляции.

На рис. 4.24 представлено изменение количества связующего по высоте изоляции стержня турбогенератора ТВФ. Видно, что при высоте сечения стержня 120 мм количество связующего в верхней точке более чем в 1,5 раза меньше, чем в нижней, что свидетельствует о перемещении пропитывающего компаунда в изоляции сверху вниз.

Для устранения этого недостатка необходимо было более подробно изучить процесс изменения вязкости пропиточного компаунда от времени хранения и температуры. Анализ результатов исследований изменения вязкости пропиточного компаунда от времени выдержки при постоянной температуре показал, что

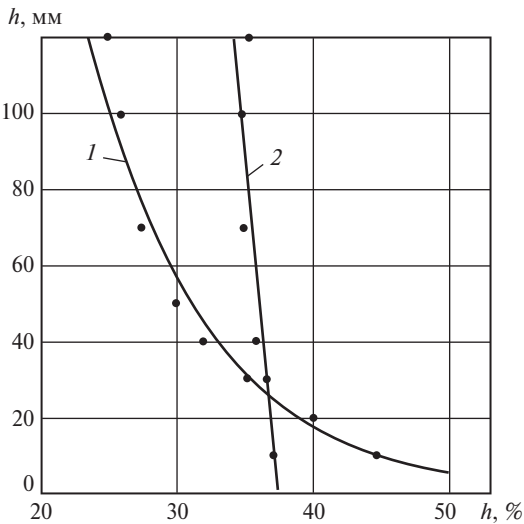


Рис. 4.24. Изменение количества связующего по высоте стержня турбогенератора ТВФ:

1 — без ускорителя; 2 — с ускорителем

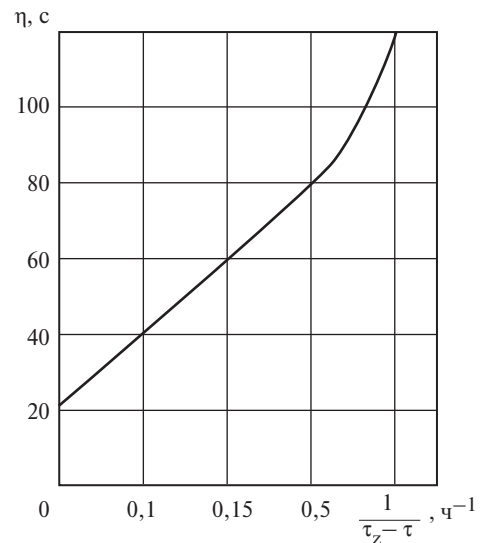


Рис. 4.25. Изменение вязкости компаунда ПК-11 от времени выдержки при темпера-

туре $\eta = f\left(\frac{1}{\tau_z - \tau}\right)$

данную зависимость в интересующей нас части процесса можно представить линейной в координатах η и $\frac{1}{\tau_z - \tau}$, которая описывается формулой:

$$\eta = A \left(\frac{1}{\tau_z - \tau} \right) + B, \quad (4.1)$$

где η — вязкость пропиточного состава; τ — время начала разогрева; τ_z — время гелеобразования компаунда при данной температуре; A и B — характеристические постоянные для данной температуры и системы смола—отвердитель.

Необходимо было найти такую зависимость, когда $\tau \rightarrow \tau_z$.

Из анализа зависимостей, представленных в системах координат $(\eta; \tau)$ (рис. 4.19) и $\left(\eta; \frac{1}{\tau_z - \tau}\right)$ (рис. 4.25), следует, что процесс отверждения эпоксидной смолы кислотным ангидридом можно разделить на два периода. В первом периоде не наблюдается увеличение вязкости пропиточного компаунда, а во втором скорость возрастания вязкости увеличивается (довольно длительное время зависимость роста вязкости компаунда от времени в системе координат $\left(\eta; \frac{1}{\tau_z - \tau}\right)$ остается линейной).

Замеченное явление (наличие двух, различных фаз при росте вязкости во время отверждения) можно объяснить, базируясь на результатах исследований Фиша и Гофмана, согласно которым при отверждении эпоксидных смол кислотными ангидридами происходят прежде всего следующие реакции:

- присоединение кислотного ангидрида к гидроксильным группам в эпоксидной смоле, в результате чего образуется кислый сложный эфир со свободными карбоксильными группами;
- присоединение карбоксильных групп к эпоксидным группам, в результате чего образуется сложный эфир и гидроксильная группа.

В начальном периоде отверждения протекает в основном первая реакция. Это подтверждается отсутствием карбоксильных групп в системе. В результате этой реакции из двух низкомолекулярных соединений образуется новое соединение, молекулярная масса которого лишь незначительно отличается от молекулярной массы исходного компонента (смолы). Именно поэтому в этот период наблюдается сравнительно небольшой рост вязкости компаунда.

Во втором периоде отверждения карбоксильные группы одной молекулы смолы вступают в реакцию с гидроксильными группами другой молекулы смолы, что вызывает значительный рост молекулярной массы и, как следствие, рост вязкости компаунда.

Ввиду того, что в (4.1) содержатся три характеристические постоянные для данной системы смола—отвердитель, для данной температуры A , B и τ_z (и в

особенности τ_z) можно рассчитать по трем измерениям вязкости в тот период, когда выполняется уравнение (4.1).

После простых преобразований получим уравнение:

$$\tau_z = \frac{\eta_1 \tau_1 (\tau_3 - \tau_2) + \eta_2 \tau_2 (\tau_1 - \tau_3) + \eta_3 \tau_3 (\tau_2 - \tau_1)}{\eta_1 (\tau_3 - \tau_2) + \eta_2 (\tau_1 - \tau_3) + \eta_3 (\tau_2 - \tau_1)}, \quad (4.2)$$

где η_1, η_2, η_3 — вязкость компаунда после нагрева или хранения в течение времени равного соответственно τ_1, τ_2, τ_3 .

Расчеты по (4.2) значительно упрощаются в том случае, если измерения вязкости производить через равные отрезки времени:

$$\tau_3 - \tau_2 = \tau_2 - \tau_1 = \frac{1}{2} (\tau_1 - \tau_3), \quad (4.3)$$

отсюда

$$\tau_z = \frac{\eta_1 \tau_1 + \eta_3 \tau_3 - 2\eta_2 \tau_2}{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3}. \quad (4.4)$$

Используя данные, полученные по измерениям вязкости во время разогрева или хранения, можно рассчитать время гелеобразования компаунда. Кроме того, формула (4.1) позволяет рассчитать вязкость системы смола—ангидрид после длительного нагрева этой системы (вблизи точки гелеобразования), исходя из данных измерений, проведенных в более раннем периоде, когда не существовало угрозы гелеобразования компаунда в вискозиметре.

Такой подход характеризует систему смола — отвердитель и изменение их вязкости в процессе хранения или разогрева. Используя эти данные, можно построить график нарастания вязкости компаунда до определенного ее уровня. На рис. 4.26 приведены зависимости срока жизни эпоксидных компаундов от температуры до вязкости 60 с по ВЗ-4. У эпоксидного компаунда на основе смолы ЭД и малеинового отвердителя, применяемого для пропитки изоляции «Монолит», в процессе хранения при температурах от 60 до 120 °С происходит быстрое нарастание вязкости по сравнению с эпоксидным компаундом на основе смолы ЭД-22 и ИМТГФА (компаунд ПК-11). Таким образом, для изоляции «Монолит-2» необходимо повышать температуру пропиточного компаунда ПК-11 до 150 °С и пропитывать в течение 15 ч, чтобы повысить вязкость компаунда в изоляции. Но в этом случае повысится вязкость и в окружающем обмотки компаунде, что приведет к сокращению времени его использования.

Изучением вопроса повышения вязкости в процессе отверждения изоляции занимались многие специалисты. Исследована возможность применения в качестве отвердителей нерастворимых в эпоксиде при невысоких температурах дициандиаминов, которые вступают в реакцию с эпоксидом при температурах 100—120 °С. Рассматривался вопрос введения в эпоксидный компаунд ускорителя, обеспечивающего быстрое отверждение композиции при температурах запекания изоляции.

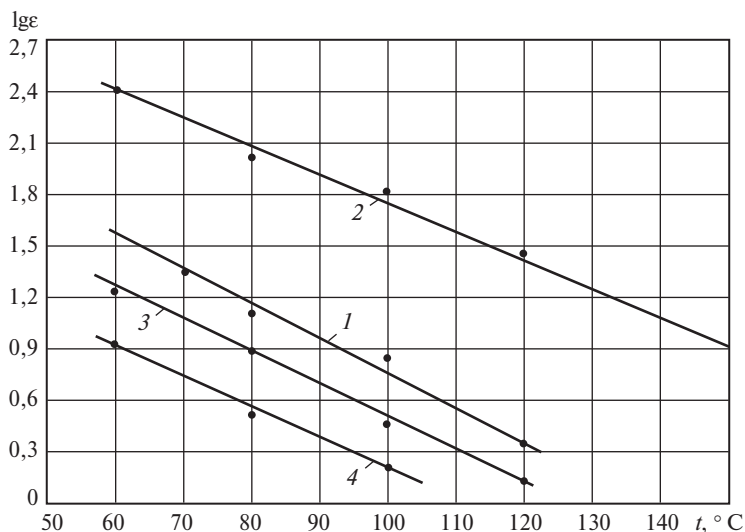


Рис. 4.26. Зависимость срока жизни (до $\eta = 60$ с по ВЗ-4 при температуре 60°C) эпоксидных компаундов от температуры:

1 — ЭД-6 и малеиновый ангидрид; 2 — ПК-11; 3 — ПК-11 + 0,5 % ТЭА; 4 — ПК-11 + 0,5 % УП-0628

Таблица 4.2

Изменение продолжительности отверждения эпоксидного компаунда при введении в него ускорителя ДМП-30

Температура отверждения, $^\circ\text{C}$	Время отверждения, ч			
	Количество ускорителя, в.ч. на 100 в.ч. смолы			
	0	0,5	1,0	2,0
60	100	100	40	26
80	100	26	16	16
100	100	1,5	1,0	1,0
120	50	1,0	0,5	0,5
140	22	0,5	0,3—0,5	0,3—0,5
160	6	0,3—0,5	—	—

При дальнейшей разработке технологии необходимо было предусмотреть меры, обеспечивающие значительное повышение вязкости или гелеобразование пропиточного состава в процессе второй стадии — пропитки и таким образом ускорить процесс гелеобразования. Для отвердителей ангидридного типа имеется большое количество ускорителей. Наиболее широко используются амины в небольших количествах от 0,1 до 2 % массы смолы.

В табл. 4.2 даны результаты влияния количества ускорителя диметиламино-метилфенола (ДМП-30) на время отверждения эпоксидного компаунда.

Таблица 4.3

Свойства эпоксидного компаунда с различными ускорителями

Тип ускорителя и количество (массовая доля к смоле)	Продолжительность отверждения при температуре 150 °С	Вязкость, с, по ВЗ-4 при температуре 50 °С	
		в исходном состоянии	после хранения в течение 5 сут при комнатной температуре
ДМП-30 — 0,3 %	20 мин	35	250
ТЭА — 0,3 %	4—5 ч	39	66

Как видно из результатов испытаний, введение ускорителя позволяет более чем в 20 раз сократить время отверждения эпоксидного компаунда.

Известно, что ускорители обладают различной активностью. В табл. 4.3 представлены результаты испытаний пропиточного компаунда с различными по активности ускорителями (ДМП-30 и триэтаноламин).

Таким образом, введением необходимого количества ускорителя соответствующей активности можно сократить время отверждения и ускорить нарастание вязкости (см. рис. 4.26). Но введение ускорителя в пропиточный компаунд сокращает срок жизни не только компаунда, вошедшего в изоляцию, но и всего заполняющего компаунда, что затрудняет многократное использование пропиточного состава. Для избежания этого, ускоритель вводился в раствор стирольного каучука, подклеивающего состава для склейки слюдинитовой бумаги со стеклотканью при изготовлении стеклослюдинитовых лент. В качестве ускорителя был использован слабореакционноспособный ускоритель триэтаноламин $N(CH_2CH_2OH)$ — ТЭА.

Исследования изменения вязкости эпоксидного компаунда ПК-11 с различным содержанием ТЭА при разных температурах (рис. 4.27, 4.28) показали, что

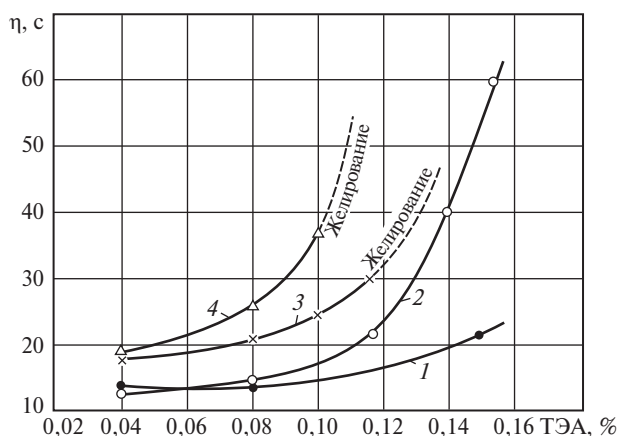


Рис. 4.27. Зависимость вязкости эпоксидного компаунда при выдержке в течение 2 ч при различных температурах от содержания ТЭА:

1 — 100 °С; 2 — 120 °С; 3 — 140 °С; 4 — 160 °С

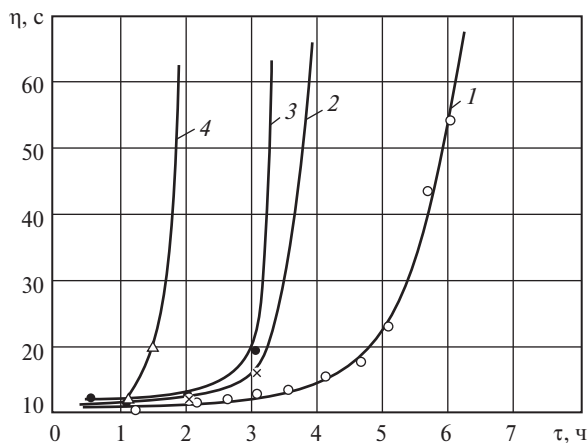


Рис. 4.28. Зависимость вязкости эпоксидного компаунда с различным содержанием ТЭА от времени выдержки при температуре 120 °C:

1 — 0,04 %; 2 — 0,08 %; 3 — 0,1 %; 4 — 0,5 % (к массе смолы)

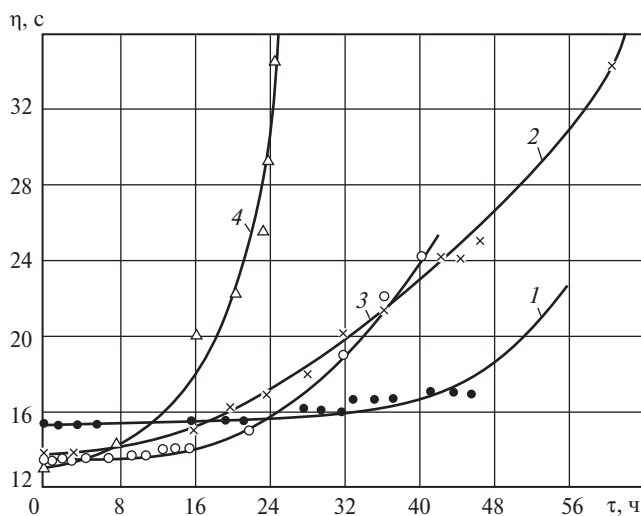


Рис. 4.29. Зависимость вязкости эпоксидного компаунда от времени выдержки при различных температурах:

1 — 100 °C; 2 — 120 °C; 3 — 140 °C; 4 — 160 °C

введение от 0,04 до 0,15 % ускорителя значительно сокращает срок жизни компаунда. Для сравнения на рис. 4.29 приведено изменение вязкости компаунда без ускорителя. Таким образом, было установлено, что введение ускорителя ТЭА обеспечивает быстрое желирование компаунда в изоляции, устраняя при этом возможность его вытекания из изоляции в процессе подъема температуры при запекании. Для подтверждения этого были изготовлены макеты, изолированные стеклослюдинитовыми лентами с ускорителем ТЭА и без него. Толщина

изоляции макетов составляла 3 мм на сторону. Макеты пропитывались по технологии изготовления изоляции «Монолит-2».

Особое внимание уделялось изменению характеристик в процессе увлажнения, так как считалось, что введение ускорителя снижает влагостойкость изоляции. На рис. 4.30 приведены результаты определения электрической прочности изоляции макетов при температуре 20 °С после 32 сут выдержки в среде $97 \pm 3\%$ относительной влажности. Испытания показали достаточную влагостойкость обоих вариантов изоляции. Электрическая прочность снижается не более чем на 5—7 % при сохранении более высоких значений у изоляции, содержащей ускоритель.

На рис. 4.31 приведено изменение сопротивления изоляции от времени увлажнения. Сопротивление изоляции в течение 3—4 сут снижается от $(5 \div 7)10^{12}$ до $(6 \div 8)10^{11}$ Ом и затем в течение 30 сут до $(2 \div 3)10^{11}$ Ом. Следова-

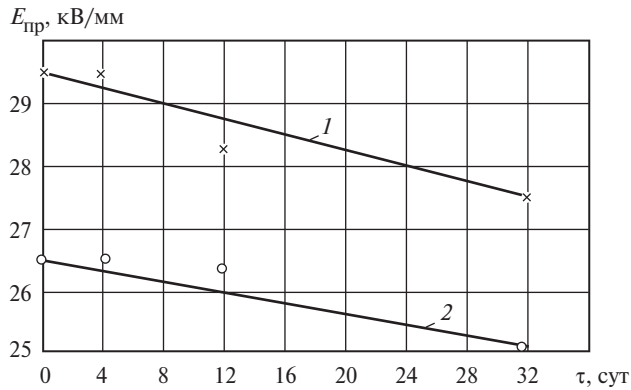


Рис. 4.30. Изменение электрической прочности изоляции «Монолит-2» в процессе увлажнения:

1 — изоляция с ускорителем; 2 — изоляция без ускорителя

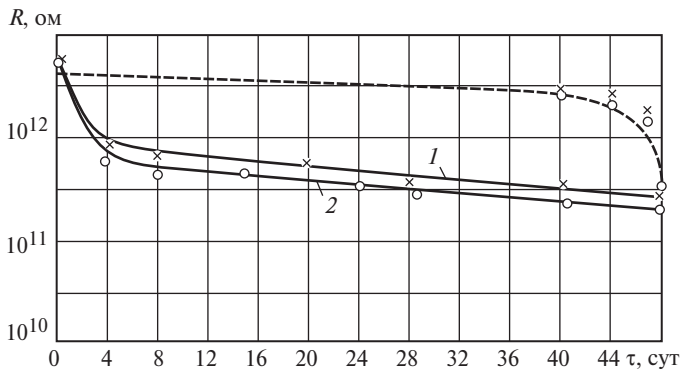


Рис. 4.31. Изменение сопротивления изоляции «Монолит-2» в процессе увлажнения:

1 — изоляция с ускорителем; 2 — изоляция без ускорителя; — — — увлажнение; - - - - - восстановление

тельно, длительная выдержка изоляции в среде $97 \pm 3 \%$ относительной влажности не приводит к заметному изменению сопротивления изоляции.

На рис. 4.32 приведены результаты изменения сопротивления изоляции после 150 сут старения при температуре 180°C в процессе увлажнения. Изоляция с ускорителем в процессе увлажнения имеет сопротивление на порядок ниже, чем изоляция без ускорителя. Необходимо отметить, что сопротивление увлажненной изоляции определяется ее поверхностным сопротивлением. Действительно, как показано на рис. 4.32, после выдержки в течение 2 сут на воздухе при комнатной температуре сопротивление быстро восстанавливается. Это также указывает на отсутствие расслоения изоляции. Проведенные испытания показали, что наибольшее поверхностное увлажнение наблюдается у макетов, изготовленных из стеклослюдинитовых лент с ускорителем. Для определения времени жизни изоляции на макетах были проведены испытания при неизменном напряжении 25 кВ, результаты которых приведены в табл. 4.4.

В таблице даны результаты пробоя 10 образцов из 20 макетов. Полученные результаты испытаний показали, что изоляция, содержащая ускоритель ТЭА, по своим электрическим характеристикам превосходит изоляцию без ускорителя (время до пробоя образца почти в 2 раза больше), что показывает эффективность ускорителя, устраняющего вытекание компаунда из изоляции. Однако

Таблица 4.4

Время жизни изоляции макетов при напряжении 25 кВ, ч

Параметр	Номер образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время пробоя макетов без ускорителя	297	515	667	819	1214	1272	1352	1403	1434	1450
Время пробоя макетов с ускорителем	630	1041	1086	1096	1520	1550	2262	2680	2700	2730

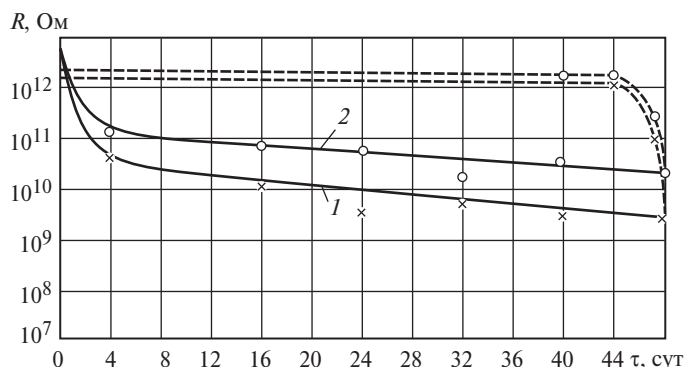
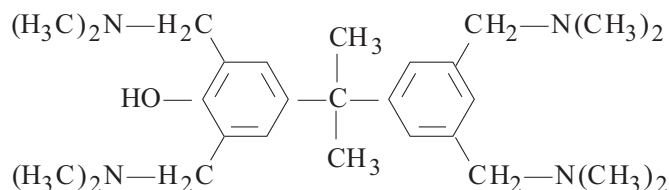


Рис. 4.32. Изменение сопротивления изоляции «Монолит-2» после 150 сут старения при температуре 180°C в процессе увлажнения:

1 — изоляция с ускорителем; 2 — изоляция без ускорителя; — — — — увлажнение; — — — — восстановление

впоследствии стирольный каучук как подклеивающее вещество был заменен на натуральный. Ускоритель ТЭА не совмещался с раствором натурального каучука в толуоле и выпадал в осадок. Поэтому были продолжены поиски нового типа ускорителя для введения его в стеклослюдинитовую ленту.

Испытания по возможности применения ускорителя УП-606/2 показали, что при технологических операциях изготовления изоляции этот тип ускорителя легко улетучивается. Поэтому лента с таким видом ускорителя обладает нестабильными свойствами, что значительно снижает электрофизические характеристики изоляции. Поэтому было предложено в качестве аминного ускорителя использовать ускоритель УП-0628 (бис/1,5-диметиламинофенол/-4-метана) структурной формулы



Ускоритель УП-0628 хорошо растворим в ацетоне, толуоле, бензоле, спирте и т.д. Для определения эффективности применения ускорителя УП-0628 были изготовлены образцы лент для сравнительных испытаний с ускорителями ТЭА и УП-606/2. Количество вводимого ускорителя было взято для всех типов одинаковое: 10 % массы к массе каучука, что составит при содержании каучука 5—6 % 0,4—0,5 % к смоле, входящей в изоляцию при пропитке.

После удаления растворителя из материала по количеству азота было определено содержание ускорителя в ленте после сушки. При испытании оказалось, что среднее содержание ускорителя УП-0628 составляет 98 %, ускорителя УП-606/2 — 65 %, ТЭА — 47 % введенного. Затем на образцах было определено время желатинизации пропитывающего компаунда по потере текучести. Результаты испытаний приведены в табл. 4.5.

В процессе исследований было подтверждено, что ускоритель УП-0628 обладает большей стабильностью, практически не изменяется его содержание в процессе технологических режимов изготовления изоляции и применение этого типа ускорителя существенно сокращает время желирования пропиточного компаунда по сравнению с остальными видами ускорителей.

Так как ускоритель полимеризации компаунда вводился в слюдосодержащую ленту, необходимо было выяснить изменение параметров вязкости пропиточного компаунда, вошедшего в изоляцию, в зависимости от количества ускорителя, введенного в ленту в процессе изготовления изоляции «Монолит-2». Для исключения влияния различных факторов опыты по определению изменения вязкости проводились на чистом компаунде с введением в него расчетного количества ускорителя. Проводилось определение нарастания вязкости компаунда ПК-11 и композиций, имитирующих состав в зоне пропитки, — компаунда с добавлением 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 % ускорителя УП-0628. Компаунд ПК-11 был

Таблица 4.5

Время желатинизации пропитывающего компаунда в зависимости от типа ускорителя

Партии материала с различным ускорителем		Время желатинизации компаунда, мин	
		120 °С	160 °С
Ускоритель УП-0628	1-я	90	—
	2-я	92	—
	3-я	88	—
Ускоритель ТЭА	1-я	600	133
	2-я	600	215
	3-я	600	168
	4-я	600	182
	5-я	600	192
Ускоритель УП-606/2	1-я	150	—
	2-я	244	—
	3-я	270	—
	4-я	135	—

приготовлен из эпоксидной смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА в соотношении 100:80.

Так как в технологических работах по определению вязкости пропиточного компаунда широко используется вискозиметр ВЗ-4, то представлялось интересным одновременно с определением условной вязкости провести измерения и динамической вязкости. Определение динамической вязкости проводилось на реовискозиметре Хеплера. На рис. 4.33 приведена графическая связь этих пара-

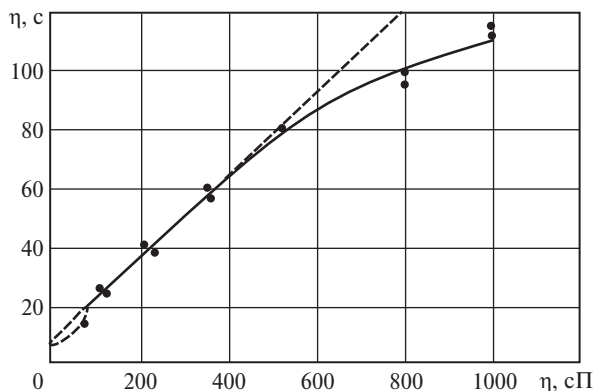


Рис. 4.33. Зависимость между динамической вязкостью (реовискозиметр Хеплера) и условной вязкостью по ВЗ-4) для пропиточного компаунда ПК-11:

— — экспериментальная кривая; - - - — теоретическая прямая

метров, полученная для компаунда ПК-11. В диапазоне 20—80 с (50—500 сП) наблюдалась почти линейная корреляция между обеими величинами, для которой по методу наименьших квадратов найдено аналитическое выражение:

$$\eta_{\text{сП}} = -67 + 7,2\eta_{\text{с}}. \quad (4.5)$$

Погрешность этого выражения составила ± 15 сП, т.е. около 8 %, что соответствует точности экспериментального определения динамической вязкости. При вязкости композиции ниже 50 сП (20 с) зависимость между динамической и условной вязкостью отклонялась от линейной. Это вызвано, очевидно, большой скоростью истечения низковязкой композиции из сопла воронки ВЗ-4. Возникшая при этом турбулентность в потоке приводит к возрастанию сопротивления в сопле, вследствие чего скорость потока снижается. Отклонение от линейной зависимости при вязкости композиции более 500 сП связано, по-видимому, с образованием в компаунде агрегатных надмолекулярных частиц, и композиция перестает быть «ньютоновской» жидкостью.

Установленная линейная связь между значениями условной и динамической вязкости в диапазоне 50—500 сП (20—80 с) позволила в дальнейшем использовать для изучения оба метода и проводить перерасчет и сравнение результатов, найденных как при измерении вязкости по ВЗ-4, так и на реовискозиметре. Для удобства обработки результатов измерение вязкости проводили при $60 \pm 0,5$ °С независимо от того, при какой температуре проводилась выдержка. Вязкость компаунда ПК-11 определялась при разных температурах.

Изменение вязкости эпоксидных компаундов при хранении при температуре 60 °С приведено на рис. 4.34. Подобные же кривые были получены для компаундов, хранившихся при температуре 20 (рис. 4.35) и 40 °С.

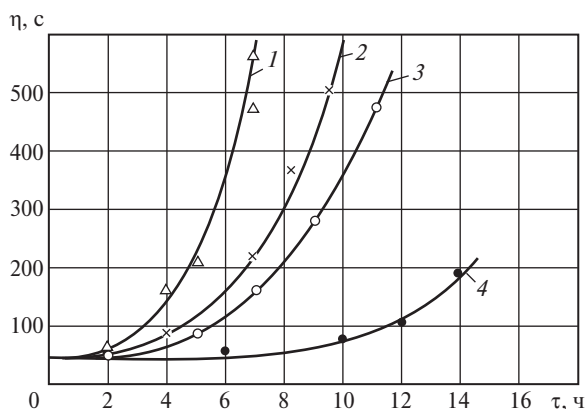


Рис. 4.34. Зависимость вязкости компаундов от времени выдержки при температуре 60 °С и количества введенного ускорителя УП-0628:

1 — 1 %; 2 — 0,75 %; 3 — 0,5 %; 4 — 0,25 %

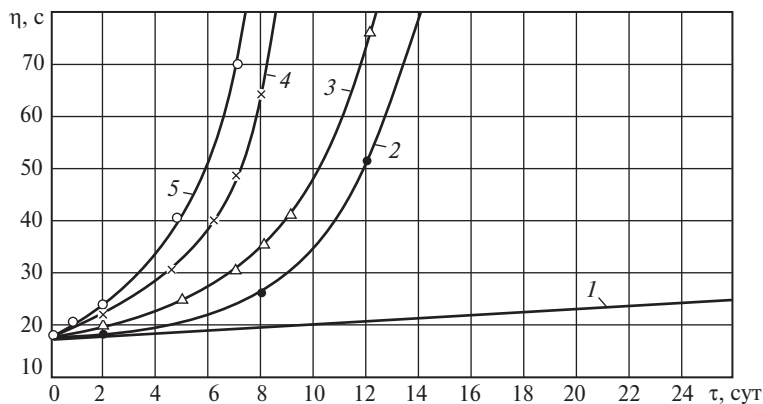


Рис. 4.35. Изменение вязкости эпоксидного компаунда ПК-11 с ускорителем УП-0628 в процессе хранения при температуре 20 °С ($t_{\text{изм}} = 60$ °С):

1 — без ускорителя; 2 — 0,25 %; 3 — 0,5 %; 4 — 0,75 %; 5 — 1,0 %

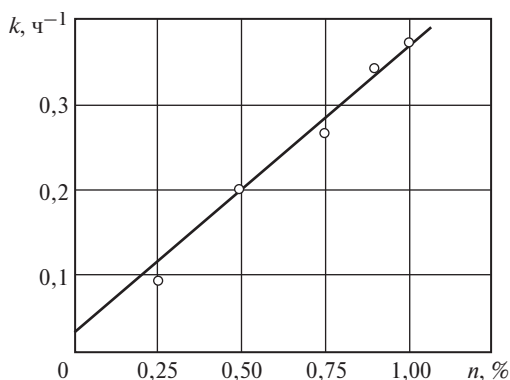


Рис. 4.36. Зависимость константы нарастания вязкости от содержания ускорителя

Холандсом и Кальниным было установлено, что нарастание вязкости η в системе эпоксидная смола — ангидрид в зависимости от времени выдержки можно описать уравнением:

$$\eta = \eta_1 \exp(k\tau), \quad (4.6)$$

где η_1 — предэкспоненциальный множитель; τ — время выдержки состава, ч; k — константа скорости роста вязкости, ч^{-1} .

Как видно на рис. 4.36, 4.37 для компаунда ПК-11 без ускорителя и с добавкой УП-0628 эти закономерности тоже соблюдаются. Коэффициенты линейного уравнения, связывающего изменение вязкости с временем выдержки,

$$\ln \eta = \ln \eta_1 + k\tau \quad (4.7)$$

для всех изученных систем были рассчитаны по методу наименьших квадратов и приведены в табл. 4.6.

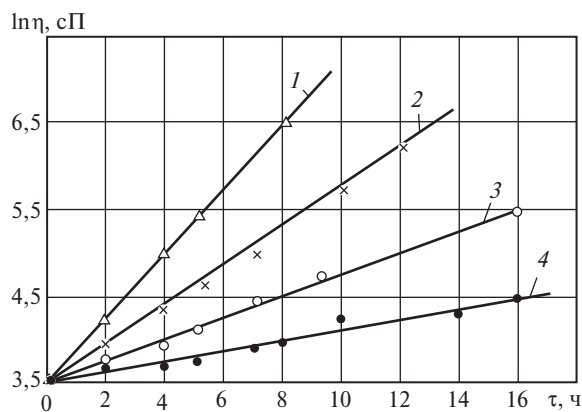


Рис. 4.37. Зависимость динамической вязкости компаундов от времени выдержки при температуре 60 °С и количества введенного ускорителя УП-0628:

1 — 1,0 %; 2 — 0,75 %; 3 — 0,50 %; 4 — 0,25 %

Как видно из табл. 4.6, значения свободного члена уравнения, полученного для систем при различной температуре и с различным содержанием ускорителя, различались не более чем на 5 %, т.е. они практически не изменялись с изменением условий выдержки компаундов. Значение η_0 соответствовало вязкости исходного компаунда при температуре измерения 60 °С.

Используя уравнение 4.7 и данные табл. 4.6, можно получить уравнения для расчета вязкости компаундов в зависимости от времени выдержки при различных температурах.

Для компаунда без ускорителя:

$$\begin{aligned} \text{температура } 40^\circ\text{С} \quad \ln \eta &= 5,17 + 0,0235\tau; \\ 60^\circ\text{С} \quad \ln \eta &= 3,89 + 0,0566\tau; \\ 80^\circ\text{С} \quad \ln \eta &= 2,89 + 0,011\tau \end{aligned} \quad (4.8)$$

Для компаунда с 0,25 % ускорителя УП-0628:

$$\begin{aligned} \text{температура } 20^\circ\text{С} \quad \ln \eta &= 3,85 + 0,0056\tau; \\ 40^\circ\text{С} \quad \ln \eta &= 3,73 + 0,046\tau; \\ 60^\circ\text{С} \quad \ln \eta &= 3,63 + 0,1\tau. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Таблица 4.6

Коэффициенты уравнения η_1 , k , рассчитанные для компаундов с разным содержанием ускорителя при разных температурах

Параметр	Массовая доля ускорителя, %, при температуре, °С											
	0,25			0,50			0,75			1,0		
	25	40	60	25	40	60	25	40	60	25	40	60
η_1 , сП	3,85	3,73	3,63	3,7	3,7	3,6	3,8	3,66	3,5	4,0	3,61	3,46
k , ч ⁻¹	0,0056	0,046	0,1	0,0075	0,081	0,2	0,0096	0,144	0,24	0,12	0,225	0,36

Для компаунда с 0,5 % ускорителя УП-0628:

$$\begin{aligned} \text{температура } 20\text{ }^{\circ}\text{C} & \quad \ln \eta = 3,7 + 0,0075\tau; \\ 40\text{ }^{\circ}\text{C} & \quad \ln \eta = 3,7 + 0,081\tau; \\ 60\text{ }^{\circ}\text{C} & \quad \ln \eta = 3,6 + 0,2\tau. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Для компаунда с 0,75 % ускорителя УП-0628:

$$\begin{aligned} \text{температура } 20\text{ }^{\circ}\text{C} & \quad \ln \eta = 3,8 + 0,00965\tau; \\ 40\text{ }^{\circ}\text{C} & \quad \ln \eta = 3,66 + 0,1446\tau; \\ 60\text{ }^{\circ}\text{C} & \quad \ln \eta = 3,5 + 0,24\tau. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Для компаунда с 1,0 % ускорителя УП-0628:

$$\begin{aligned} \text{температура } 20\text{ }^{\circ}\text{C} & \quad \ln \eta = 4,09 + 0,012\tau; \\ 40\text{ }^{\circ}\text{C} & \quad \ln \eta = 3,61 + 0,225\tau; \\ 60\text{ }^{\circ}\text{C} & \quad \ln \eta = 3,46 + 0,36\tau. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Изменение вязкости жидкостей в зависимости от температуры можно описать уравнением Аррениуса:

$$\eta_0 = \eta_{00} \exp \frac{\Delta H_{\eta}}{RT}, \quad (4.13)$$

или в логарифмическом виде

$$\ln \eta_0 = \ln \eta_{00} + \frac{\Delta H_{\eta}}{RT}, \quad (4.14)$$

где η_0 — начальная вязкость компаунда; η_{00} — предэкспоненциальный множитель для вязкости; ΔH_{η} — энергия активации вязкого течения, ккал/моль; R — газовая постоянная, $R = 1,987$ кал/(град · моль); T — температура, К.

Так как рассчитанное значение η_0 из уравнения (4.13) соответствует вязкости компаунда без введенного ускорителя, можно предположить, что эта закономерность останется справедливой и при других температурах, т.е. член $\ln \eta_0$ соответствует логарифму вязкости компаунда без ускорителя при той же температуре.

Аналитическое уравнение для ПК-11 имеет вид:

$$\ln \eta_0 = -11,7 + 5,2 \cdot 10^3 \frac{1}{T}, \quad (4.15)$$

где T — температура, К. Энергия активации вязкого течения для этой композиции составляла 10,3 ккал/моль.

Уравнением Аррениуса можно описать и зависимость скорости реакции от температуры. Приняв, что возрастание вязкости в композиции с течением времени описывается константой скорости K , связанной с реакцией полимеризации, для температурной зависимости:

$$K_0 = K_{00} \exp \left(- \frac{\Delta H_K}{RT} \right). \quad (4.16)$$

На рис. 4.38 приведена зависимость логарифма скорости нарастания вязкости компаунда с ускорителем УП-0628 от температуры. Общее изменение вязкости эпоксидной композиции, зависящее как от времени пребывания при данной температуре, так и от самой температуры, можно описать уравнением, объединяющим (4.14) и (4.16).

В логарифмической форме это объединенное уравнение (4.14) и (4.16) выглядит так:

$$\ln \eta_0 = \ln \eta_{00} + \frac{\Delta H_{\eta}}{RT} + K_{00} \exp \left(- \frac{\Delta H_K}{RT} \right), \quad (4.17)$$

где K_{00} — предэкспоненциальный множитель константы скорости (4.16); η_0 — начальная вязкость компаунда; η_{00} — предэкспоненциальный множитель для вязкости; ΔH_{η} — энергия активации вязкого течения, ккал/моль; T — температура, К; τ — время, ч; ΔH_K — энергия активации полимеризации, ккал/моль; R — газовая постоянная, $R = 1,987$ кал/(град · моль).

Это уравнение позволяет установить связь между вязкостью композиции, температурой и временем пребывания состава в различных температурных режимах. Оно может быть полезно для решения многих практических задач.

Особенности поведения композиции с различным содержанием ускорителя особенно удобно проследить по анализу эквивискозиметрических кривых, построенных для уровней вязкости 300, 500, 1500, 5000, 50 000 сП. Эквивискозиметрические кривые представляют собой кривые равной вязкости, построенные в системе координат время—температура. Они дают представление о времени достижения выбранного уровня вязкости с учетом температуры. При построении таких кривых обычно задаются некоторыми определенными уровнями вяз-

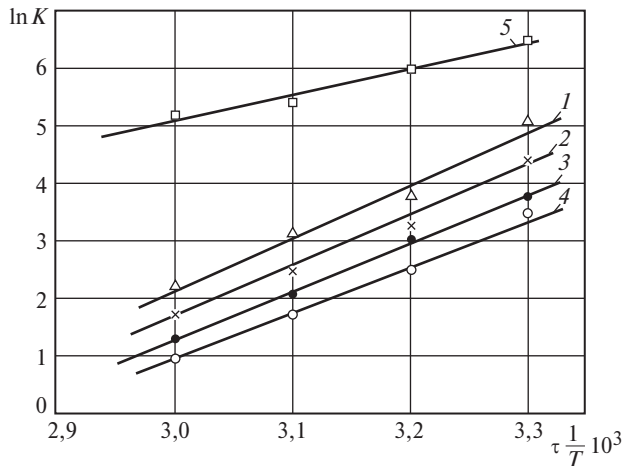


Рис. 4.38. Зависимость логарифма скорости нарастания вязкости компаунда с ускорителем УП-0628 от температуры:

1 — 1,0 %; 2 — 0,75 %; 3 — 0,50 %; 4 — 0,25 %; 5 — без ускорителя

кости и рассчитывают время достижения этого значения в системе при некоторой заданной температуре. Отдельные точки с эквивалентной вязкостью, полученные при различной температуре, соединяют плавной кривой. При построении семейств эквивискозиметрических кривых для изучения систем были выбраны уровни вязкости, имеющие конкретный технологический смысл: уровень вязкости 200—300 сП — область, наиболее широко используемая для пропитки; 500 сП — вязкость, при которой еще идет пропитка стеклослюдинитовых лент; 1500 сП — максимальная вязкость, при которой еще можно проводить пропитку стеклослюдинитовых лент под большим давлением; 5000 сП — в системе появляется клеящая способность; 50 000 сП соответствует точке гелеобразования.

При построении эквивискозиметрических кривых расчеты выполнялись по модифицированному уравнению (4.1)7, имеющему вид:

$$\ln \eta = -11,7 + 5,2 \cdot 10^3 \frac{1}{T} + \tau \exp \left(\ln K_{00} - \frac{\Delta H_K}{RT} \right), \quad (4.18)$$

для которого коэффициенты $\ln K_{00}$ и ΔH_K были найдены по методу наименьших квадратов (табл. 4.7).

В табл. 4.8—4.12 приведены значения времени жизни компаунда до достижения заданного уровня вязкости, а на рис. 4.39—4.43 даны эквивискозиметрические кривые, построенные для составов с различным содержанием ускорителя.

Таблица 4.7

Значения констант $\ln K_{00}$, ΔH_η и $\ln \eta_{00}$, найденные из температурных зависимостей нарастания вязкости компаундов с различным содержанием ускорителя УП-0628

Содержание ускорителя, %	Значения констант			
	$\ln \eta_{00}$	ΔH_η , ккал/моль	$\ln K_{00}$	ΔH_K , ккал/моль
0	11,8	10,4	10,5	9,6
0,25	—	—	18,6	14,1
0,50	—	—	22,3	16,1
0,75	—	—	26,4	18,4
1,0	—	—	15,8	11,24

Таблица 4.8

Время выдержки эпоксидного компаунда ПК-11 с содержанием ускорителя УП-0628 0,25 % до достижения заданной вязкости при различной температуре

Вязкость критическая, сП	Время выдержки до достижения вязкости $\tau \frac{1}{T} 10^3$, ч						
	3,30	3,20	3,00	2,80	2,68	2,54	2,42
300	28	35	19	7	4,0	1,7	0,8
500	69	55	24	8,5	4,2	1,8	0,9
1500	158	99	35	11	5,4	3,0	1,0
5000	255	147,5	47	14	7,0	3,0	1,5
50000	444	241	70	20	5,5	3,5	1,7

Таблица 4.9

Время выдержки эпоксидного компаунда ПК-11 с содержанием ускорителя УП-0628 0,5 % до достижения заданной вязкости при различной температуре

Вязкость критическая, сП	Время выдержки до достижения вязкости $\tau \frac{1}{T} 10^3$, ч						
	3,30	3,20	3,00	2,80	2,68	2,54	2,42
300	23,5	26,5	12,0	3,6	1,8	0,65	0,29
500	58,0	42,0	14,8	4,3	1,9	0,7	0,31
1500	134,0	75,5	21,5	5,68	2,4	0,9	0,6
5000	216,0	112,5	29,0	7,1	3,0	1,0	0,45
50 000	376,0	184,0	43,0	10,0	4,5	1,44	0,6

Таблица 4.10

Время выдержки эпоксидного компаунда ПК-11 с содержанием ускорителя УП-0628 0,75 % до достижения заданной вязкости при различной температуре

Вязкость критическая, сП	Время выдержки до достижения вязкости $\tau \frac{1}{T} 10^3$, ч					
	3,30	3,20	3,00	2,80	2,68	2,42
300	18	18	6,3	1,55	0,6	0,07
500	47	28	8,0	1,8	0,7	0,07
1500	107	51	11,6	2,4	0,9	0,09
5000	174	76	15,6	3,0	1,1	0,10

Таблица 4.11

Время выдержки эпоксидного компаунда ПК-11 с содержанием ускорителя УП-0628 1,0 % до достижения заданной вязкости при различной температуре

Вязкость критическая, сП	Время выдержки до достижения вязкости $\tau \frac{1}{T} 10^3$, ч					
	3,30	3,20	3,00	2,80	2,68	2,42
300	5,3	7,8	5,4	3,0	2,0	0,45
500	13,1	12,3	8,0	3,44	1,9	0,5
1500	30,0	22,0	10,0	5,0	2,46	0,6
5000	49,0	33,0	13,0	5,74	3,0	0,8
50 000	85,0	54,0	20,0	8,0	4,0	1,0

Таблица 4.12

Время выдержки эпоксидного компаунда ПК-11 без ускорителя до достижения заданной вязкости при различной температуре

Вязкость критическая, сП	Время выдержки до достижения вязкости $\tau \frac{1}{T} 10^3$, ч							
	3,30	3,20	3,00	2,80	2,68	2,54	2,42	2,3
300	261	405	345	225	139	86	55	37
500	654	646	438	266	159	96	61	40
1500	1500	1165	638	353	203	118	73	47
5000	2430	1720	854	446	250	142	98	52
50 000	4200	2797	1276	633	340	188	113	67

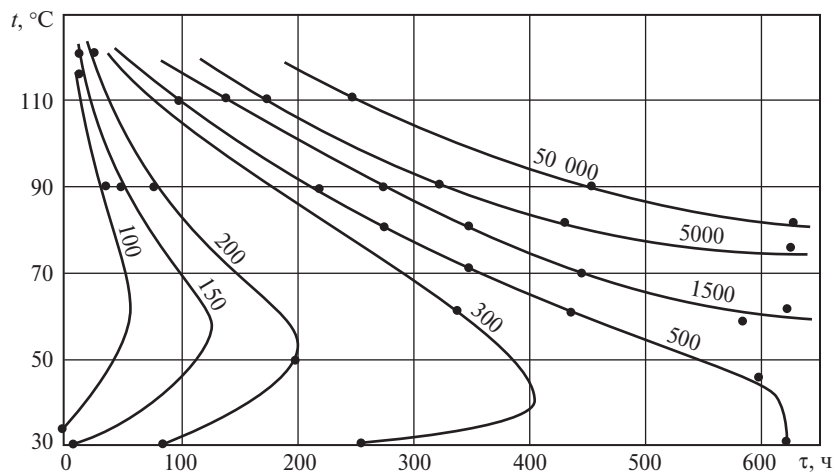


Рис. 4.39. Эквивискозиметрические кривые для компаунда ПК-11 без ускорителя

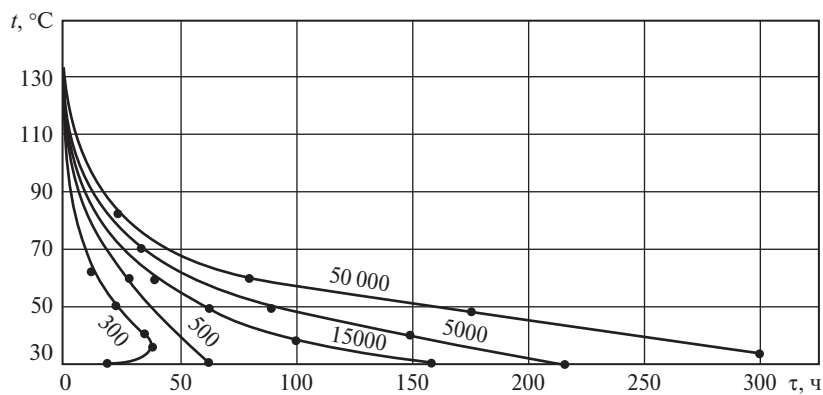


Рис. 4.40. Эквивискозиметрические кривые для компаунда ПК-11 с 0,25 % ускорителя

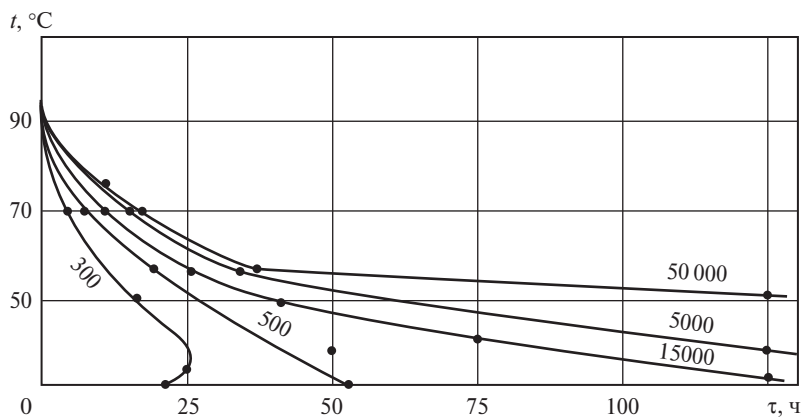


Рис. 4.41. Эквивискозиметрические кривые для компаунда ПК-11 с 0,5 % ускорителя

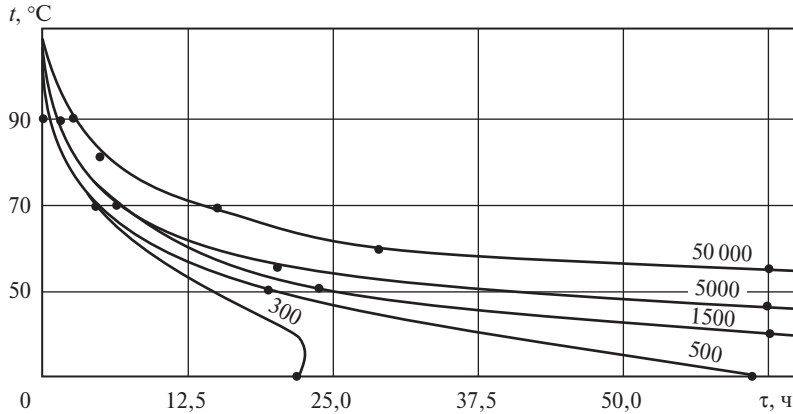


Рис. 4.42. Эквивискозиметрические кривые для компаунда ПК-11 с 0,75 % ускорителя

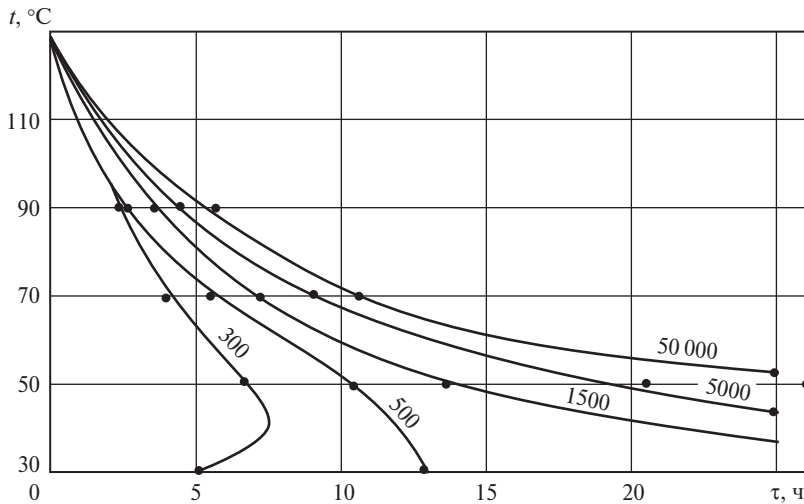


Рис. 4.43. Эквивискозиметрические кривые для компаунда ПК-11 с 1 % ускорителя

Из приведенных данных видно, что нарастание вязкости в присутствии ускорителя происходило значительно быстрее, чем в компаунде без ускорителя.

Из полученных эквивискозиметрических данных для уровня вязкости $5 \cdot 10^4$ сП легко определить время гелеобразования в системах с различным содержанием ускорителя в зависимости от температурных режимов. Для температур до 100—120 °C найденное из кривых время гелеобразования совпадало с определенным экспериментально (рис. 4.44). Для более высоких температур корреляция значений вычисленного и найденного времени гелеобразования хуже, что, по-видимому, можно объяснить изменением механизма полимеризации. Полученные эквивискозиметрические кривые позволяют определить жизнеспособность композиций. Например, если вязкость композиции с 0,25 % ускорителя

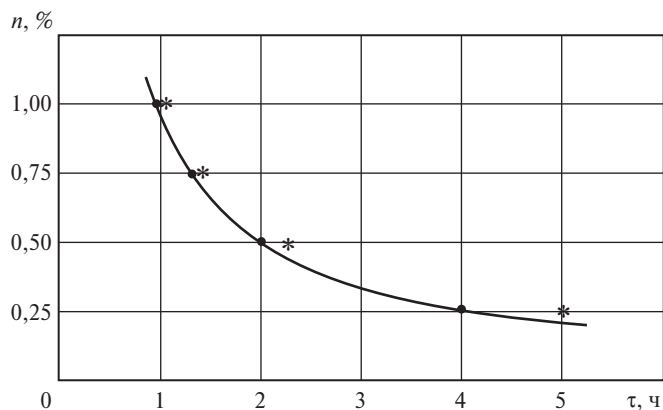


Рис. 4.44. Зависимость времени гелеобразования компандов от содержания ускорителя:

● — расчетные точки; * — экспериментальные точки

теля в данный момент равна 300 сП (60 с), то можно считать, что через 18 ч при выдержке компанда при 60 °С она возрастет до 500 сП (80 с), а через 36 ч станет непригодной для пропитки и т.д.

Интересно отметить, что эквивискозиметрические кривые для низких вязкостей (300 сП) имеют максимум, соответствующий оптимальной температуре сохранения компанда до достижения предельной вязкости. Это видно на эквивискозиметрических кривых для чистого компанда ПК-11. Известно, что наилучшей способностью к пропитке обладает этот компанд до достижения вязкости около 50 сП. Из рис. 4.45 следует, что наибольшей жизнеспособностью до сохранения вязкости не выше 50 сП компанд будет обладать при температуре 80 °С, в то время как при температуре 60 °С его жизнеспособность значительно (почти в 2 раза) ниже. Для работы при вязкости не более 150 сП наиболее благоприятна температура 60 °С, а для сохранения вязкости компанда ниже 300 сП желательно хранить его при температуре 40 °С.

В производственных условиях происходит постоянное обновление компанда примерно на 5—15 % ежедневно. Поэтому основной рабочий диапазон температур при пропитке должен составлять 50—60 °С, что обеспечивает пропитку изоляции компандом, вязкость которого не превышает 200 сП (40 с), и практически неограниченный срок использования компанда. На рис. 4.46 показано изменение вязкости пропиточного компанда в производственных условиях в течение 40 сут с обновлением 7,5 % ежедневно. Как видно из полученных данных, рабочая вязкость не превышает 35 с по ВЗ-4 (150 сП) в течение исследуемого периода.

На рис. 4.45 в температурно-временных координатах показаны характеристики режима изготовления изоляции обмоток электрических машин, начиная со стадии пропитки. На этом же рисунке приведена эквивискозиметрическая кривая для компанда ПК-11 для вязкости 50 сП. При этой вязкости компанд легко заполняет все пустоты в обмотке. Однако такая низкая вязкость способствует вытеканию компанда из обмотки после пропитки. На графике эквивис-

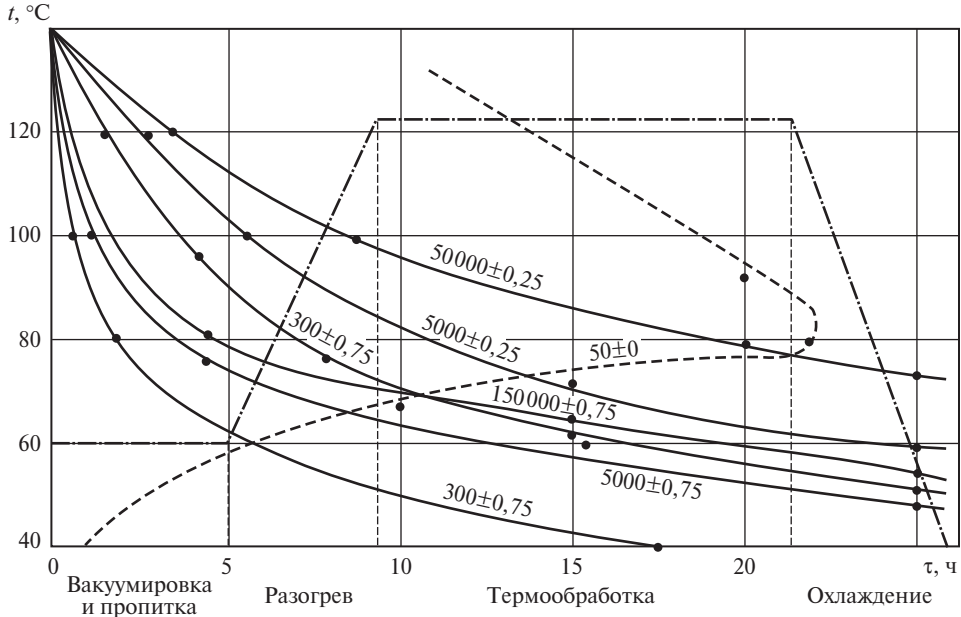


Рис. 4.45. Температурно-временной график изготовления обмоток с изоляцией «Монолит-2» и эквивискозиметрические кривые для компаундов

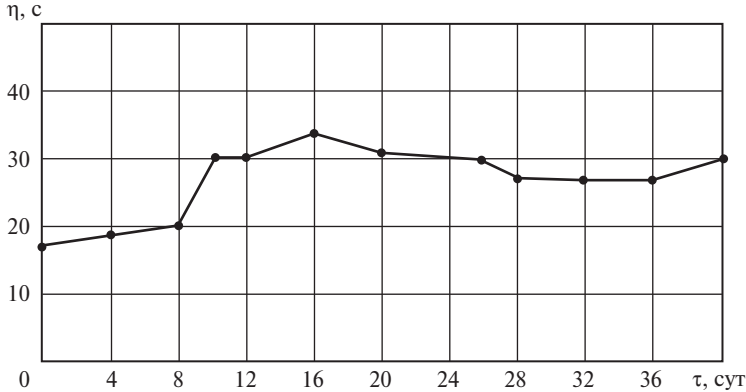


Рис. 4.46. Изменение вязкости компаунда на участке пропитки статоров при ежедневном, в среднем 7,5 %, добавлении свежеприготовленного компаунда $t_{\text{изм}} = 60^\circ\text{C}$

козиметрическая кривая смещена в область высоких температур как при режиме пропитки, так и во время подъема температуры для термообработки и даже в первые 3 ч термообработки. При наличии в пропиточном компаунде ускорителя этого не должно наблюдаться. Даже применение ленты с содержанием ускорителя 0,25 % в приповерхностном слое уже в первый час после окончания пропитки при достижении температуры чуть выше 80°C вязкость композиции достигает 300 сП, что достаточно для придания компаунду

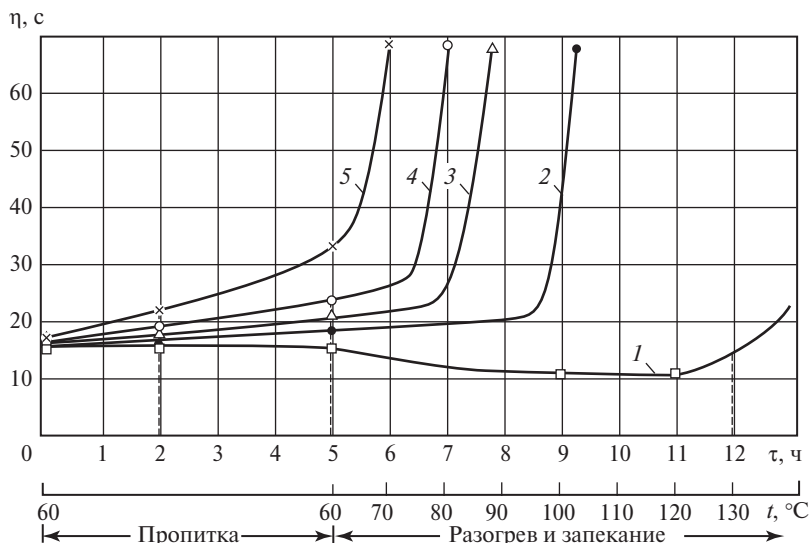


Рис. 4.47. Изменение вязкости пропиточного компаунда с ускорителем в процессе пропитки и запекание обмоток:

1 — без ускорителя; 2 — 0,25 %; 3 — 0,5 %; 4 — 0,75 %; 5 — 1,0 %

тиксотропности, т.е. отсутствия вытекания компаунда из обмотки после снятия давления. При большом содержании ускорителя (на рис. 4.45 и 4.47) (0,75 %) уже после окончания пропитки вязкость композиции достаточна для предотвращения вытекания. Устранение вытекания в значительной мере способствует улучшению качества изоляции, изготавливаемой методом вакуум-нагнетательной пропитки.

Возвращаясь к рис. 4.44, можно утверждать, что наличие ускорителя полностью обеспечивает равномерное содержание связующего в изоляции и устраняет возможность перемещения компаунда в изоляции.

Выбор соответствующего количества ускорителя можно сделать только после широкого технологического опробования в заводских условиях. Это требование исходит из того, что масса пропиточной коробки, обмоток, компаунда очень велика и составляет несколько тонн, поэтому создать во всей этой массе равномерный температурный режим на изоляции обмоток практически не представляется возможным. Применяемые стеклослюдинитовые ленты имеют большой разброс по содержанию подклеивающего связующего в ленте, а следовательно, колеблется содержание ускорителя. Поэтому для выяснения возможности применения лент с ускорителем УП-0628 и определения его оптимального количества были изготовлены партии лент с содержанием ускорителя 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 %. Опробование проводилось на натуральных обмотках стержней гидрогенератора с толщиной изоляции 3 мм на сторону. Пропитка велась по обычному процессу изготовления изоляции «Монолит-2», только процесс отверждения был сокращен до 10 ч при температуре 120 °C. Характеристики изоляции стержней приведены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Характеристики изоляции стержней гидрогенераторов с различным количеством введенного ускорителя УП-0628

Содержание ускорителя УП-0628, %	Температура и время запекания	Значение tg δ при напряжении			Пробивное напряжение, кВ	Электрическая прочность, кВ/мм	Степень полимеризации, %		
		3 кВ	6 кВ	9 кВ					
0,5	120 °С, 10 ч	0,4	5,2	6,4	100	33	98,8		
		0,3	4,0	5,3	100	33	97,0		
		0,4	4,2	4,9	103	34			
					102	34			
					105	35			
					101	34			
					105	35			
					101	34			
					99	33			
		0,75	120 °С, 10 ч	0,6	4,8	6,0	100	33	96,0
0,4	3,0			4,2	97	32			
0,6	5,5			6,8	103	34			
0,2	3,9			5,2	107	36			
					101	34			
					105	35			
					82	27			
					100	33			
					94	31			
1,0	120 °С, 10 ч	1,1	4,0	5,7	106	35	98,0		
		0,3	2,5	4,0	95	32			
		0,4	3,3	4,2	103	34			
		0,4	2,8	4,4	102	34			
					101	34			
					98	33			
					80	27			
					106	35			
					102	34			
					87	29			
		0,75		0,6	9,9	11,9		40	Есть белые пятна
		0,78		0,4	4,9	7,1		2,7—28	
1,0		0,6	4,9	7,1	58				

Испытания электрической прочности изоляции стержней показали, что изоляция, выполненная из лент с 0,5 % ускорителя имеет более однородные и стабильные характеристики. При использовании ленты с содержанием ускорителя 0,75 и 1,0 % на части стержней были обнаружены белые пятна непропитанной изоляции, электрическая прочность этих стержней более чем в 2 раза ниже, что указывает на недопропитку изоляции.

Таким образом, применение ленты с содержанием ускорителя 0,75 и 1,0 % при изготовлении стержневых обмоток нецелесообразно, так как вязкость пропиточного компаунда в процессе пропитки изоляции, содержащей большое количество ускорителя, повышается, в результате чего часть слоев изоляции не успевает пропитаться. Поэтому была рекомендована к использованию изоляция, выполненная из лент, содержащих 0,5 % ускорителя.

На рис. 4.48 приведены значения распределения электрической прочности изоляции «Монолит-2» с ускорителем УП-0628 по сравнению с микалентной компаундированной изоляцией и применяемой изоляцией «Монолит-2». Как видно применение ускорителя УП-0628 позволило повысить более чем на 25 % электрическую прочность обмоток. На рис. 4.49 представлена зависимость пробивного напряжения изоляции «Монолит-2», содержащей ускоритель УП-0628, от толщины по сравнению с серийно выпускаемой. Применение ускорителя УП-0628 позволило повысить электрическую прочность изоляции от 28 до 35 кВ/мм и сократить время запекания изоляции в 1,5 раза.

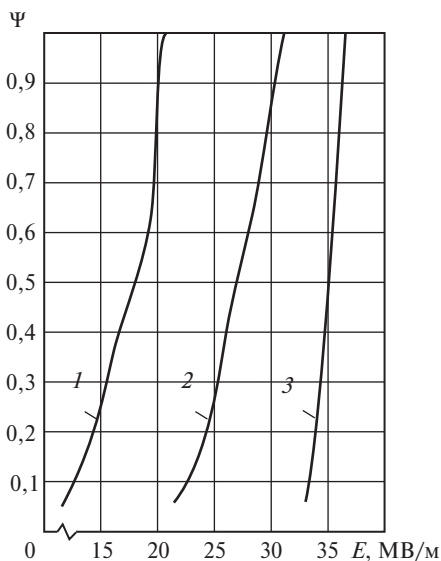


Рис. 4.48. Распределение значений электрической прочности изоляции:

1 — МКИ; 2 — изоляция «Монолит-2» без ускорителя; 3 — изоляция «Монолит-2» с ускорителем УП-0628

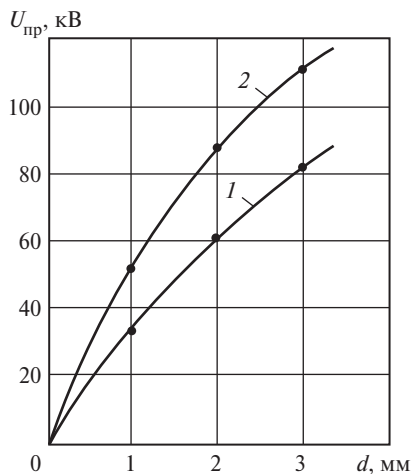


Рис. 4.49. Зависимость пробивного напряжения изоляции «Монолит-2» от толщины:

1 — изоляция «Монолит-2» без ускорителя; 2 — усовершенствованная изоляция «Монолит-2» с ускорителем УП-0628

4.2.2. Влияние ускорителей, вводимых в стеклослюдинитовую ленту, на жизнеспособность эпоксидного компаунда при вакуум-нагнетательной пропитке

Ускоритель УП-0628 обладает высокой реакционной способностью даже при невысоких температурах пропитки и хранения. Так как при пропитке обмоток компаундом заполняется все свободное пространство в пропиточной емкости, то количество компаунда в десятки раз превышает необходимое. Поэтому целесообразно было определить влияние ускорителя УП-0628, вводимого в ленту, на вязкость пропитывающего компаунда, окружающего обмотку. В этом случае существует непосредственный контакт окружающего компаунда с компаундом, пропитывающим изоляцию с ускорителем, возможна диффузия ускорителя в окружающий компаунд, что приведет к сокращению срока жизни пропитывающего компаунда. Кроме того, часть компаунда при извлечении обмотки стекает с ее поверхности, что также может влиять на срок жизни компаунда. Исследовалось изменение вязкости пропиточного состава на основе смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА, взятых в весовом соотношении 100:80, в процессе многократных пропиток образцов. Образцы представляли собой медные трубки диаметром 12 мм и длиной 90 мм, на которые наносилась вполнахлеста стеклослюдинитовая лента с разным содержанием различных типов ускорителей. Для проверки возможности исключения диффузии ускорителя часть макетов с наибольшим содержанием ускорителей была защищена фторопластовой пленкой толщиной 30 мкм, шириной 40 мм, намотанной вполнахлеста.

В табл. 4.14 представлены виды используемых макетов.

Для проведения испытаний была изготовлена партия компаунда, которая постоянно находилась при температуре 60 °С. Одновременно в индивидуальных емкостях пропитывалось по три образца каждого вида. Емкость с чистым компаундом, в который образцы не помещались, выдерживалась при тех же условиях. Соотношение количества ленты и пропитывающего компаунда по массе

Таблица 4.14

Виды макетов

Макет	Ускоритель	Количество ускорителя, %
Образцы, изолированные лентой с ускорителем плюс фторопластовая пленка	УП-606/2	3
Образцы, изолированные лентой с ускорителем	УП-606/2	1,2
Образцы, изолированные лентой с ускорителем плюс фторопластовая пленка	УП-0628	3,1
Образцы, изолированные лентой с ускорителем	УП-0628	1,7
Образцы, изолированные лентой с ускорителем	ТЭА	1,2
Компаунд без образцов	—	—

было взято 1:50, что примерно соответствует заводским условиям при пропитке натуральных обмоток. Пропитка проводилась следующим образом:

- емкости с образцами, разогретыми до 60 °С, помещали в пропиточный котел, разогретый до 60 °С;
- котел вакуумировали в течение 1 ч при остаточном давлении 0,06 кПа;
- под вакуумом подавали порции компаунда в каждую емкость;
- создавали давление 0,8 МПа и осуществляли выдержку под давлением в течение 4 ч.

Затем образцы извлекали из компаунда, после чего определяли вязкость пропиточного компаунда в емкости, где пропитывались образцы, и емкости помещались в термостат при температуре 60 °С. На следующий день в пропиточный компаунд, которым накануне пропитывались образцы, добавлялось 10 % компаунда, постоянно находящегося при температуре 60 °С (компенсация компаунда, использованного для пропитки изоляции), и проводилась пропитка следующих партий образцов. Было проведено восемь пропиток. На рис. 4.50 показаны изменения вязкости пропитывающего компаунда в процессе пропиток различных макетов.

Испытания компаунда, в котором пропитывались образцы без фторопластовой пленки (кривые 1, 2), показали ускоренное старение компаунда в процессе пропиток, и в результате вязкость после семи пропиток составила более 70 с по ВЗ-4, что, несомненно, свидетельствует о диффузии ускорителя в пропиточный компаунд.

У компаунда, в котором пропитывались образцы, имеющие защитную фторопластовую пленку, изменилась вязкость (кривые 3, 4) аналогично изменению вязкости чистого компаунда (кривая 5). Это повышение вязкости обусловлено естественным старением компаунда при температуре 60 °С.



Рис. 4.50. Изменение вязкости компаундов в процессе пропиток:

1 — компаунд с образцами из ленты с УП-0628; 2 — компаунд с образцами из ленты с УП-606/2; 3 — компаунд с образцами из ленты с УП-0628 с пленкой; 4 — компаунд с образцами из ленты с УП-606/2 с пленкой; 5 — чистый компаунд

У компаундов, которыми пропитывались образцы 3, 4, дополнительно проверялось наличие ускорителя в компаунде по разработанной ВНИИЭИМ методике. Анализ также показал отсутствие ускорителя в компаунде.

Большой интерес представляли оценка времени, в течение которого происходила диффузия ускорителя из изоляции, защищенной фторопластовой пленкой, и определение толщины изоляции l , с которой будет выделяться ускоритель за время пропитки.

Время выхода фактически диффундирующего вещества на поверхность плоской пластины толщиной l в первом приближении выражается формулой:

$$\tau = \frac{l^2}{6D}, \quad (4.19)$$

где D — коэффициент диффузии.

Таким образом, для определения времени τ необходимо знать коэффициент диффузии ускорителя в компаунде и геометрические размеры образца. Экспериментальное определение коэффициента D затруднено, так как ускоритель активно реагирует с компаундом, в результате чего концентрация и вязкость среды изменяются не только из-за диффузии, но и вследствие реакции.

Точная теория диффузии в жидкостях не известна. Однако имеются приближенные формулы (см. Р. Берд, В. Стюарт, Е. Лайторут. Явления переноса. Химия. М., 1974), по которым можно получить достаточно достоверные результаты. Приближенную оценку коэффициента диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$, осуществляют по уравнению для малых концентраций вещества A «проникающего» в вещество B :

$$D_{AB} = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{\varphi_B M_B} T}{\eta \bar{V}_A \cdot 0,6}, \quad (4.20)$$

где η — вязкость раствора, сП; $\bar{V}_A$ — молярный объем вещества A при его нормальной температуре; M_B — молекулярная масса вещества B ; φ_B — параметр ассоциации вещества B , для воды он равен 2,6; метилового спирта 1,5; для неассоциируемых растворителей (бензола, эфира и др.) — 1,0.

Для разбавленных растворов погрешность этого уравнения примерно 10 %, что можно считать достаточно хорошей точностью. В данном случае, когда нужен лишь порядок величины D , применение (4.20) представляется вполне оправданным. Например, при применении ускорителя УП-0628: $M_B = 500$ моль; $\bar{V}_A = 200$ моль, вязкость η при 60 °С равна 150—180 сП, при этом $D = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$.

Так как изоляция покрывается защитной пленкой, наносимой вполнахлеста, длина диффузии равна половине ширины защитной пленки. В случае применения в качестве защитной фторопластовой пленки шириной 40 мм значение τ будет равно примерно 100 ч, что значительно (более чем в 20 раз) превышает время пропитки. Таким образом, время диффузии значительно и при данных условиях ускоритель не должен переходить в пропиточный состав.

4.2.3 Пропитка изоляции из стеклослюдинитовых лент

При разработке и исследовании изоляции важно установить влияние разработанных технологических параметров на пропитываемость изоляции.

Основным компонентом изоляции является слюдяная бумага. Пористые ленты на основе слюдяной бумаги, применяемые для вакуум-нагнетательной пропитки, различаются по степени впитываемости на несколько порядков. Кроме того, электрическая прочность слюдяных бумаг зависит от их воздухопроницаемости. Проведенные испытания показали, что слюдяные бумаги с малой проницаемостью, например бумаги типа Samica, имеют более высокую электрическую прочность, чем бумаги Remica. Изменение проницаемости порядка 10^2 дает изменение электрической прочности на 15—20 %. Измерения, проведенные на изоляции, подтверждают эту тенденцию, но показывают несколько меньшую зависимость электрической прочности от пористости. Считается, что для вакуум-нагнетательной пропитки удобнее использовать сильно пористые слюдяные бумаги. При этом снижение электрической прочности на 5—10 % компенсируется более быстрой и надежной пропиткой.

В отечественном электромашиностроении для изоляции в основном применяется слюдинитовая бумага. Сравнительные исследования слюдинитовой и слюдопластовой бумаг показали, что пропитка слюдинитовой бумаги ухудшается более чем в 3 раза при увеличении ее толщины от 40 до 120 мкм. У слюдопластовой бумаги ухудшение пропитки наблюдалось при увеличении толщины от 75 до 120 мкм. При этом пропитываемость слюдопластовой бумаги почти в 5 раз выше, чем слюдинитовой такой же толщины.

Для высоковольтной изоляции недопустимы воздушные включения, которые могут образовываться в результате недопропитки. Недопропитка существенно снижает электрофизические характеристики изоляции. При изучении процесса пропитки применили ряд основных положений из теории фильтрации. Вследствие очень малого сечения пор в слюдинитовой бумаге и медленного проникновения в нее пропиточного состава движение жидкости является ламинарным и характеризуется малым числом Рейнольдса. Диаметр пор в слюдинитовой бумаге не выше 10^{-5} см, поэтому число Рейнольдса $Re = \frac{v_d}{\nu} = 8,8 \cdot 10^{-9}$,

т.е. очень малая величина. А для фильтрации при $Re \leq 6$ сохраняется ламинарное движение жидкости в порах.

Поры могут быть связанными и изолированными. Интегральной характеристикой пористой среды является пористость, равная отношению объемов пор к общему объему материала. Значительно труднее описать структуру пористых тел, так как размеры и форма пор очень малы и разнообразны.

В настоящее время еще не разработаны обоснованные способы количественного описания структуры пористых сред. Часто пользуются распределением пор по размерам, но само понятие «размер» поры остается неопределенным.

В некоторых случаях используют средний радиус пор. Однако эти параметры удовлетворительно характеризуют только однородные изотропные пористые среды.

Пористая структура пропитываемого материала весьма сложная, и ее нельзя считать однородной. Материал состоит из чередующихся слоев стеклоткани и слюдинитовой или слюдопластовой бумаги. Пористость стеклоткани весьма неоднородна. В ней можно выделить два класса пор: большие поры (до 0,2 мм) между нитями и малые поры (1,5—15 мкм) вытянутой формы между волокнами. В слюдинитовой бумаге поры имеют щелевидную форму и направлены вдоль плоскости бумаги. Поэтому для рассматриваемого случая можно определить пористость стеклослюдинитовой ленты.

Обозначим полный объем стеклослюдинитовой изоляции V_1 , объем чешуек слюды, склеивающего вещества и стеклянных волокон через V_2 , тогда объем пор и каналов в изоляции будет $V_3 = V_1 - V_2$. Отношение $V_3/V_1 = m$ называется пористостью. Стеклослюдинитовая лента состоит из стеклослюдинитовой бумаги (32—34 %), стеклоткани (62—64 %) и склеивающего вещества (4 %) и имеет плотность 1,23 г/см³. Плотность отдельных элементов ленты составляет: слюдинитовой бумаги — 1,6—1,7 г/см³, стеклоткани — 1,1 г/см³, а пористость соответственно 0,46 и 0,56. Поэтому пористость стеклослюдинитовой ленты:

$$m = 0,46 \cdot 0,33 + 0,56 \cdot 0,63 = 0,5.$$

Рассмотрим качественную задачу пропитки, состоящую в движении фронта вязкой жидкости в пористом теле. Скорость движения фронта без учета влияния твердой поверхности на свойства жидкости, определяется вязкостью жидкости и структурой пористости тела.

В идеализированной однородной пористой структуре без типовых пор фронт движения жидкости равномерен, движение связано с постепенным вытеснением воздуха. При неравномерной пористости фронт движения жидкости приобретает сложную форму из-за более быстрого продвижения жидкости по крупным порам. При этом возможны образования замкнутых объемов воздуха (защемленный воздух), который при дальнейшей пропитке невозможно удалить.

Такое явление характерно для стеклопластиков, где жидкое связующее быстро распространяется между нитями, в то время как в нитях остается «защемленный воздух», вызывающий образование пор. Чем больше неравномерность пористой структуры и скорость пропитки, т.е. внешнее давление, тем больше возможность образования пор в виде «защемленного воздуха» по этому механизму.

Теория движения жидкости в пористых средах основана на замене дискретной пористости среды некоторой фиктивной сплошной средой, характеризующейся некоторыми осредненными свойствами. Это дает возможность исключить из рассмотрения пористую структуру. Наиболее простой случай описывается формулой Дарси, справедливой для установившегося ламинарного

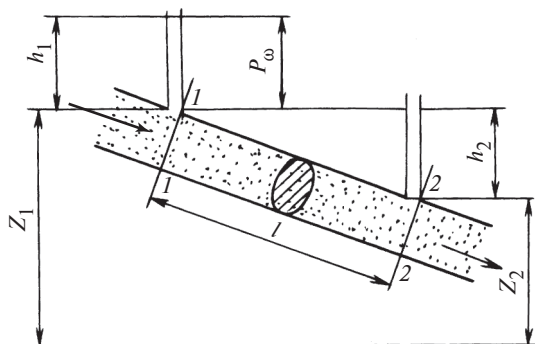


Рис. 4.51. Схематическое изображение процесса пропитки

течения и независимости структуры пор от давления. Положим, что в цилиндрической трубе, заполненной средой, происходит фильтрация в направлении, указанном на рис. 4.51.

Пусть площадь сечения трубы будет ω ; h_1 и h_2 — гидродинамическое давление в некоторых (точках сечения 1—1 и 2—2); γ — удельная масса фильтрующей жидкости; Z_1 и Z_2 — точки сечений 1—1 и 2—2. Как известно, пьезометрический напор в сечениях 1—1 и 2—2

$$p_1 = Z_1 + \frac{h_1}{\gamma} \quad \text{и} \quad p_2 = Z_2 + \frac{h_2}{\gamma}. \quad (4.21)$$

При этом скоростной напор при фильтрации

$$p_v = \frac{v^2}{2gm}. \quad (4.22)$$

Ввиду малой фильтрации скорость v является крайне малой величиной по сравнению с пьезометрическим напором. Поэтому при исследовании вопроса фильтрации скоростными напорами пренебрегают. Потери напора на участке трубы длиной l

$$P_\omega = p_1 - p_2. \quad (4.23)$$

Закон Дарси устанавливает, что расход фильтрующей жидкости линейно зависит от потери напора на данном участке:

$$Q = K \frac{p_1 - p_2}{l} \omega, \quad (4.24)$$

где K — коэффициент фильтрации.

Плотность потока или удельный расход, т.е. объемный расход на единицу площади поперечного сечения

$$q = \frac{Q}{\omega} = K \frac{p_1 - p_2}{l}. \quad (4.25)$$

Приведенная формула дает возможность определить коэффициент K , характерный для данного пористого тела и пропитывающей жидкости. Если иметь в виду, что скорость фильтрации $v = \frac{Q}{\omega}$, то закон Дарси можно представить в виде

$$v = K \frac{p_1 - p_2}{l} = K\kappa. \quad (4.26)$$

Коэффициент фильтрации K имеет размерность скорости. Зная K и кинематическую вязкость жидкостей ν , можно найти коэффициент проницаемости κ , характеризующий пористое тело, $\kappa = \frac{K}{\nu}$.

Таким образом, определив K для пористого тела с помощью какой-то одной жидкости, можно найти коэффициент фильтрации для других жидкостей, если известна их вязкость. Для неустановившегося потока, т.е. собственно пропитки, процесс описывается для изотропной пористой среды уравнениями:

$$q = -K \operatorname{grad} p = -K \left(\frac{dp}{dx} + \frac{dp}{dy} + \frac{dp}{dz} \right); \quad (4.27)$$

$$\frac{dq}{d\tau} = K \left(\frac{d^2 p}{dx^2} + \frac{d^2 p}{dy^2} + \frac{d^2 p}{dz^2} \right). \quad (4.28)$$

Основной интерес представляло изучение этих характеристик в зависимости от технологических параметров при пропитке: давления, температуры, вязкости компаунда и плотности изоляции при ее различной подпрессовке. Определение скорости пропитки проводилось с помощью установки, принципиальная схема которой представлена на рис. 4.52.

Установка состоит из термостата 7, где размещается приспособление с образцом 9, емкости 3, откуда подается компаунд, измерительной стеклянной трубки 10 с делениями и емкости 6 с теплоносителем — глицерином.

Исследуемый образец представлял собой наборный пакет из изоляционных лент, расположенных вполнахлеста, имитирующих конструкцию изоляции. Толщина образцов составляла 2; 1,8; 1,6 мм, что соответствовало различной степени запрессовки, которая фиксировалась специальным приспособлением.

Определялась скорость пропитки как поперек, т.е. перпендикулярно слоям пакета, так и вдоль слоев, для чего осуществлялась разная подводка пропитывающего компаунда к образцу, показанная на рис. 4.53. Эксперимент проводился следующим образом. В емкость 3 заливался пропиточный компаунд. Заранее устанавливалась температура в термостате 7. Затем открывались краны 2 и 5 и на поверхность компаунда подавался воздух под определенным давлением, после чего происходила пропитка образца. При появлении пропитывающего состава в измерительной трубке 10 включался секундомер и отмерялось время прохождения компаундом данного деления. В качестве пропитывающего компаунда был

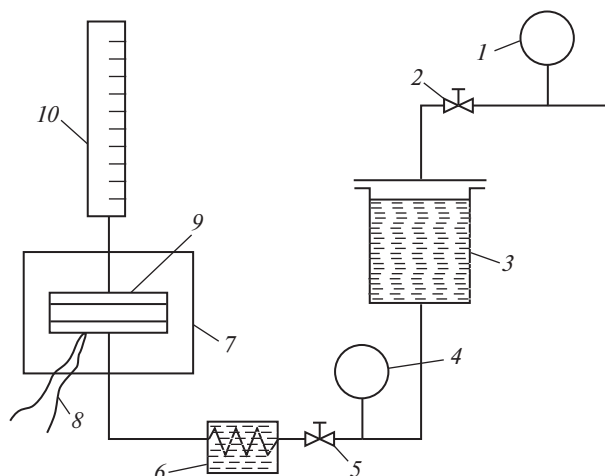


Рис. 4.52. Принципиальная схема установки для определения пропитывающей способности макетов изоляции:

1, 4 — манометры; 2, 5 — краны; 3 — емкость с компаундом; 6 — обогревательная емкость; 7 — термостат; 8 — термopара; 9 — образец; 10 — измерительная трубка

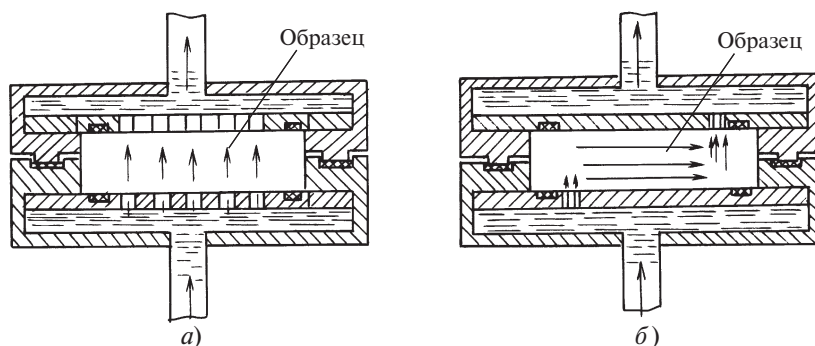


Рис. 4.53. Схема подачи компаунда для поперечной (а) и поперечно-продольной (б) пропитки образца

выбран компаунд на основе эпоксидной смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА. На рис. 4.54 представлено изменение вязкости пропитывающего компаунда в зависимости от температуры. Из графика видно, что вязкость компаунда по ВЗ-4 резко падает с повышением температуры от 40 до 80 °С (с 45 до 17 с) и дальнейшее повышение температуры не оказывает существенного влияния на вязкость. Опыты проводились при давлениях 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 МПа и температуре 60, 80 и 100 °С. Коэффициент фильтрации определялся на образцах, выполненных из двусторонней стеклослюдинитовой ленты ЛСКН-160ТТ, с коэффициентом запрессовки 3,8; 13,5 и 23 % и температурой 60, 80, 100 °С, а также на образцах, выполненных из ленты ЛСКО-180Т с коэффициентом запрессовки 9; 19,2 % и температурой 60, 80 и 100 °С.

Расчет коэффициента фильтрации K , м/с, и скорости пропитки v , кг/(с · м²), и расхода Q , кг/с, производился исходя из формулы Дарси:

$$K = \frac{Ql}{\omega p}; \quad (4.29)$$

$$v = \frac{Q}{\omega}; \quad (4.30)$$

$$Q = \frac{M}{t}. \quad (4.31)$$

На рис. 4.55 представлены результаты измерения скорости пропитки образцов из ленты ЛСКН-160ТТ с различной степенью запрессовки в зависимости от давления и температуры. Как видно из полученных данных, скорость пропитки монотонно возрастает с увеличением давления при температуре 60 и 80 °С, а при тем-

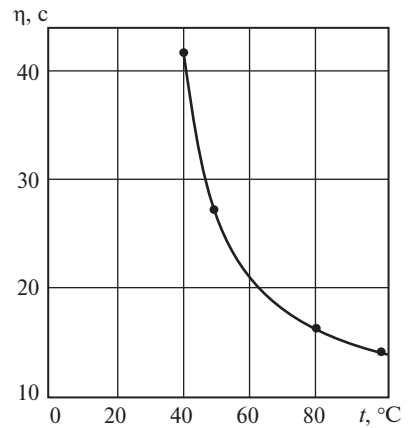


Рис. 4.54. Зависимость вязкости пропитывающего состава от температуры

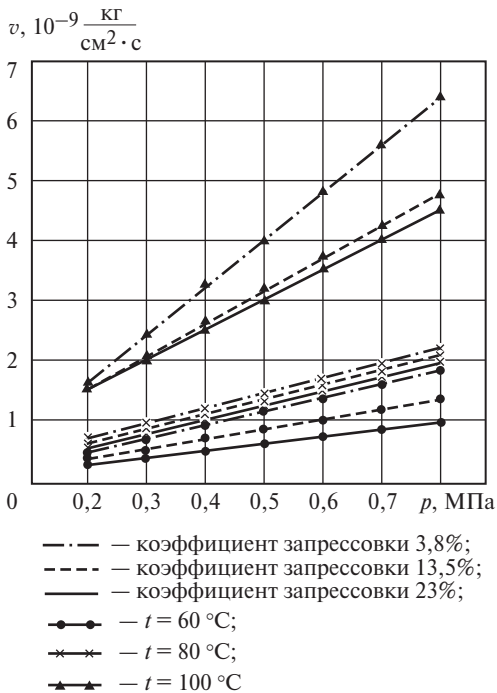


Рис. 4.55. Зависимость скорости пропитки стеклослюдинитовой ленты ЛСКН-160ТТ от давления и температуры

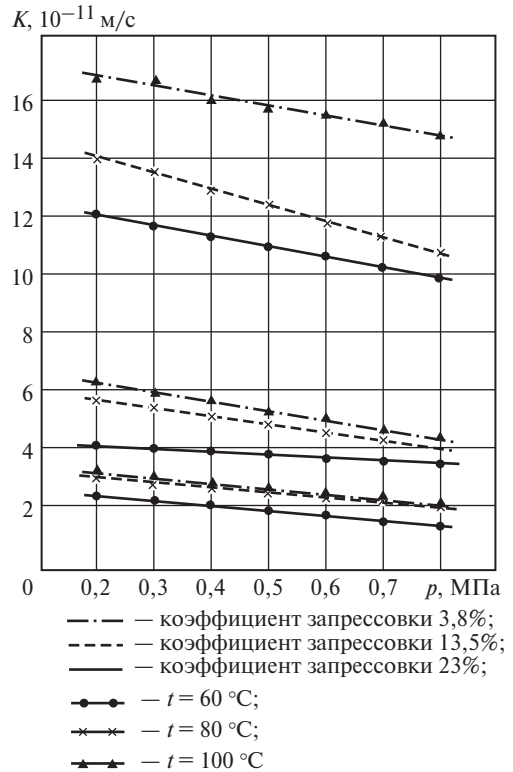


Рис. 4.56. Зависимость коэффициента фильтрации стеклослюдинитовой ленты ЛСКН-160ТТ от давления и температуры

пературе 100 °С скорость пропитки растет значительно. При этом возрастает влияние повышения давления. Если при давлении 0,2 МПа скорость пропитки образцов с запрессовкой 23 % равна $1,5 \cdot 10^{-9}$ кг/см², то при 0,8 МПа она уже равна $4,5 \cdot 10^{-9}$ кг/см², т.е. повышается в 3 раза, а по сравнению с температурой 60 °С таких же образцов — почти в 5 раз. Скорость пропитки снижается при увеличении степени запрессовки образцов от 3,8 до 23 % и давлении 0,8 МПа почти в 2 раза при температуре 60 °С; очень незначительно при 80 °С и более чем в 2 раза при температуре 100 °С.

Представленные на рис. 4.56 зависимости коэффициента фильтрации аналогичных образцов показывают уменьшение значения K в зависимости от давления. Это происходит в связи с тем, что с увеличением давления изменяется гидравлическое сопротивление испытываемого образца.

При определении скорости пропитки односторонних стеклослюдинитовых лент ЛСКО-180Т оказалось, что образцы из такой ленты пропитываются в 1,5—2,0 раза (рис. 4.57) медленнее, чем образцы, выполненные из ленты ЛСКН-160ТТ.

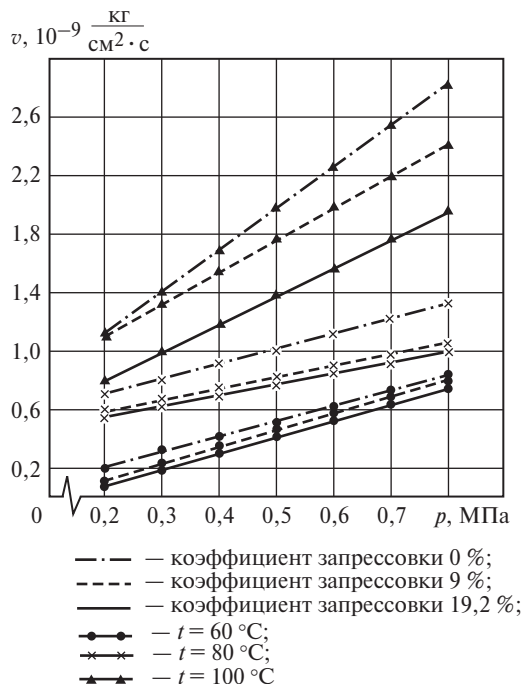


Рис. 4.57. Зависимость скорости пропитки стеклослюдинитовой ленты ЛСКО-180Т от давления и температуры

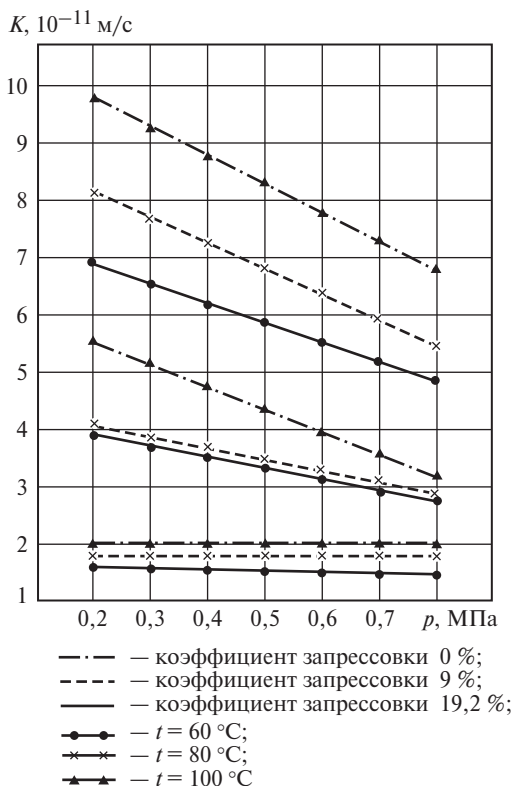


Рис. 4.58. Зависимость коэффициента фильтрации стеклослюдинитовой ленты ЛСКО-180Т от давления и температуры

Для образцов из односторонних лент также характерно, что при повышении температуры значительно увеличивается скорость пропитки.

На рис. 4.58 приведены зависимости коэффициента фильтрации K образцов, выполненных из односторонней стеклослюдинитовой ленты ЛСКО-180Т, от давления и температуры.

Коэффициент фильтрации уменьшается с увеличением давления пропитки. Снижение скорости пропитки при использовании односторонних лент объясняется дополнительной лакировкой поверхности слюдинитовой бумаги во время изготовления ленты, затрудняющей процесс пропитки. По полученным данным можно найти истинное значение коэффициента фильтрации для образцов, изготовленных из двусторонней ленты ЛСКН-160ТТ по формуле:

$$K = \frac{Ml}{\tau \omega p}, \quad (4.32)$$

где M — масса пропиточного состава; l — толщина образца; ω — площадь образца; p — давление на поверхности пропиточного состава; τ — время фиксации прохождения компаундом одного деления измерительной трубки.

В данном случае переменной величиной является τ , а M , l , ω , p — постоянные. На основании данных экспериментов гистограмма распределения времени представлена на рис. 4.59.

Распределение результатов наблюдения не подчиняется нормальному закону. Можно показать, что $t = 52,8$ с ($S_{\bar{x}} = 0,5$, $n = 40$, где $S_{\bar{x}}$ — погрешность; n — число выборок).

Тогда

$$K = \frac{Ml}{\tau \omega p} = \frac{0,62 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{52,8 \cdot 36 \cdot 10^2 \cdot 5} = 13 \cdot 10^{-11} \text{ м/с}. \quad (4.33)$$

Для оценки точности полученного значения K вычисляются частная производная и частная погрешность косвенных измерений:

$$S_{\bar{K}} = \left(\frac{dK}{dt} \right) S_{\bar{t}} = - \frac{K^2}{t^2} S_{\bar{t}} = - 0,3 \cdot 10^{-11}. \quad (4.34)$$

Таким образом, для образцов из ленты ЛСКН-160ТТ $K = (13 \pm 0,3) \times 10^{-11}$ м/с при $p = 50$ Н.

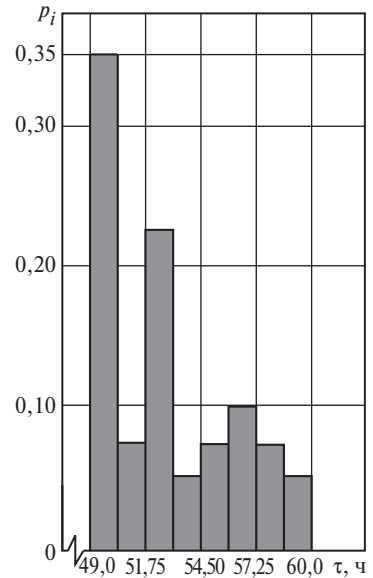


Рис. 4.59. Гистограмма распределения результатов измерения времени τ

Исследования коэффициента фильтрации K в процессе продольной пропитки образцов из ленты ЛСКН-160ТТ показали, что значения K при продольной и продольно-поперечной пропитке близки и их можно считать одинаковыми. Поэтому при дальнейших расчетах пропитки используют значения K , полученные для поперечной пропитки.

В процессе пропитки изоляции из лент, содержащих ускоритель, вязкость компаунда в зависимости от температуры и времени увеличивается и тем самым затрудняется процесс пропитки. Поэтому, исследуя процесс пропитки, необходимо знать время пропитки изоляции натурального стержня.

Рассмотрим вопросы пропитки натурального стержня. Стержень по сечению состоит из плоских частей и закруглений на углах. Время пропитки плоских $\tau_{пл}$ изделий различно и равно:

$$\tau_{пл} = \frac{mh^2}{K(p_1 + p_2 + p_3)} = ah^2, \quad (4.35)$$

где m — пористость изоляции; p_1 — давление на пропитывающий компаунд; p_2 — остаточное давление в изоляции; p_3 — давление, равновеликое силам адсорбции стеклослюдинитовой ленты и пропиточного компаунда; h — толщина изоляции; K — коэффициент фильтрации.

Время пропитки цилиндрических изделий $\tau_{угл}$ равно:

$$\tau_{угл} = \frac{a}{2} \left(2R_0h + h^2 \right) \ln \left(1 + \frac{h}{R_0} \right), \quad (4.36)$$

где $a = \frac{m}{K(p_1 + p_2 + p_3)}$; R_0 — радиус закругления стержня.

Скорость проникновения пропиточного компаунда в стержень

$$v = \frac{1}{l} \frac{dq}{dt} = m \frac{dy}{dt} = -K \frac{p_1 - p_2}{h}. \quad (4.37)$$

Отсюда изменение объема состава в единице длины стержня

$$\frac{dq}{dt} = \frac{Kl}{h} (p_1 - p_2).$$

После преобразований можно записать

$$\tau_{ст} = \frac{h}{Kl} \frac{q}{p_1} l - \frac{\beta}{1 - \alpha} \frac{p_2}{p_1} \ln \left[l - \frac{p_1(\alpha - 1)}{p_1 - \beta p_2} \right], \quad (4.38)$$

где α, β — коэффициенты корреляции давления на состав p_1 и остаточного давления в изоляции p_2 .

Полное время, необходимое для пропитки стержня, будет складываться из суммы времени пропитки изоляции и времени заполнения пустот в стержне. Так как пропитка изоляции проводится при остаточном давлении 0,01—0,03 кПа, а давление на пропиточный состав $p_1 = 0,8$ МПа, т.е. при $p_1 \gg p_2$ и, учитывая также, что $p_1 \gg p_3$ можно записать:

$$\tau_{\text{пл}} = \frac{mh^2}{Kp_1}; \quad (4.39)$$

$$\tau_{\text{угл}} = \frac{m}{2Kp_1} \left(2R_0h + h^2 \right) \ln \left(1 + \frac{h}{R_0} \right); \quad (4.40)$$

$$\tau_{\text{ст}} = \frac{h}{Kl} \frac{q_{\text{с0}}}{p_1}, \quad (4.41)$$

где $q_{\text{с0}}$ — объем пустот на единицу длины стержня.

Оценим время, которое требуется для заполнения пустот в стержне:

$$\frac{\tau_{\text{ст}}}{\tau_{\text{пл}}} = \frac{h}{Kl} \frac{q_{\text{с0}}}{p_1} \frac{Kp_1}{mh^2} = \frac{q_{\text{с0}}}{mlh}, \quad (4.42)$$

или

$$\tau_{\text{ст}} = \frac{q_{\text{с0}}}{mlh} \tau_{\text{пл}}. \quad (4.43)$$

Подставляя в последнее уравнение значения $q_{\text{с0}}$, l , h и m для стержневых обмоток, получаем

$$\tau_{\text{ст}} \approx 0,1 \tau_{\text{пл}} = 0,1 \frac{mh^2}{Kp_1}. \quad (4.44)$$

Подставив экспериментальные значения K и принятую толщину изоляции 4 мм, рассчитаем время, необходимое для пропитки стержня с различной степенью подпрессовки при температурах 60, 80 и 100 °С. Результаты расчетов приведены в табл. 4.15—4.20.

Таблица 4.15

Результаты расчета времени пропитки изоляции стержня, выполненной из ленты ЛСКН-160ТТ при температуре 100 °С

Подпрессовка изоляции, %	Коэффициент фильтрации K , 10^{-11} Н/с	Время пропитки, мин
3,8	15,0	9,5
13,8	10,8	15,4
23,0	10,0	16,6

Таблица 4.16

**Результаты расчета времени пропитки при температуре 80 °С и давлении $80 \cdot 10^4$ Па
изоляции стержня, выполненной из ленты ЛСКН-160ТТ**

Подпрессовка изоляции, %	Коэффициент фильтрации K , 10^{-11} Н/с	Время пропитки, мин
3,8	4,4	37,8
13,8	4,2	39,6
23,0	3,6	46,2

Таблица 4.17

**Результаты расчета времени пропитки при температуре 60 °С и давлении $80 \cdot 10^4$ Па
изоляции стержня, выполненной из ленты ЛСКН-160ТТ**

Подпрессовка изоляции, %	Коэффициент фильтрации K , 10^{-11} Н/с	Время пропитки, мин
3,8	2,10	79,3
13,8	2,00	83,0
23,0	1,35	123,0

Таблица 4.18

**Результаты расчета времени пропитки при температуре 100 °С и давлении $80 \cdot 10^4$ Па
изоляции стержня, выполненной из ленты ЛСКО-180Т**

Подпрессовка изоляции, %	Коэффициент фильтрации K , 10^{-11} Н/с	Время пропитки, мин
0	6,7	24,8
9,0	5,4	30,8
19,2	4,8	34,7

Таблица 4.19

**Результаты расчета времени пропитки при температуре 80 °С и давлении $80 \cdot 10^4$ Па
изоляции стержня, выполненной из ленты ЛСКО-180Т**

Подпрессовка изоляции, %	Коэффициент фильтрации K , 10^{-11} Н/с	Время пропитки, мин
0	3,1	53,7
9,0	2,8	59,5
19,2	2,7	61,7

Таблица 4.20

**Результаты расчета времени пропитки при температуре 60 °С и давлении $8 \cdot 10^4$ Па
изоляции стержня, выполненной из ленты ЛСКО-180Т**

Подпрессовка изоляции, %	Коэффициент фильтрации K , 10^{-11} Н/с	Время пропитки, мин
0	1,90	87,7
9,0	1,75	95,2
19,2	1,40	119,0

Из результатов расчета видно, что время, необходимое на пропитку изоляции стержня из лент ЛСКН-160ТТ при температуре 100 °С, в 7 раз меньше, чем при температуре 60 °С. Эта разница также справедлива и для подпрессованной изоляции. Время для пропитки изоляции стержня из односторонних слюдинитовых лент ЛСКО-180Т при температурах 80 и 100 °С примерно в 2 раза больше, чем из лент ЛСКН-160ТТ, а при температуре 60 °С эти значения различаются незначительно.

При пропитке стержневых обмоток поверх изоляции наносится антиадгезионная фторопластовая пленка, которая препятствует проникновению компаунда в изоляцию. Если при этом допустить, что пропитка изоляции проводится только с торцевых частей стержня и идет вдоль стержня, то в этом случае время на пропитку составит более 10 ч, что значительно удлиняет процесс изготовления изоляции. Для сокращения времени пропитки изоляции стержня поверх изоляции под фторопластовую пленку наносится слой стеклянной ленты со скоростью пропитки $v = 1,2 \cdot 10^{-3}$ кг/(с · м²). При такой скорости пропитки компаунд быстро распространяется вдоль стержня. После этого осуществляют поперечную пропитку изоляции стержня.

Лобовые части стержней при укладке их в пропиточную кассету подпрессовываются незначительно. Пазовые части стержней фиксируются пресс-планками, опрессовывающими изоляцию на 20—25 % с усилием $(8 \div 10)10^5$ Н/м². Соответственно время на пропитку пазовой и лобовых частей стержня различно. Поэтому для облегчения и ускорения пропитки пазовой части стержней в пресс-планках делаются пазы, через которые надрезается фторопластовая пленка, что обеспечивает проникновение пропитывающего компаунда в изоляцию.

Таким образом, время, необходимое на пропитку изоляции стержня, даже в подпрессованной части составляет около 2 ч. Это в 2 раза меньше технологического времени пропитки обмоток. Тем самым полностью обеспечивается качественная пропитка изоляции.

4.2.4. Термообработка изоляции перед пропиткой

Высокие электрические и механические свойства изоляции «Монолит-2», когда запекание после пропитки проводится без внешнего давления, обеспечиваются ускорителем реакции полимеризации и составом пропиточного эпоксидного компаунда. Ускоритель вводится в стеклослюдинитовые ленты при их изготовлении. Наличие его обусловило необходимость проведения исследований по влиянию режимов термообработки перед пропиткой на свойства обмоток.

Режимы термообработки изоляции из непропитанных стеклослюдинитовых лент применительно к технологии «Монолит», когда запекание изоляции после пропитки эпоксидным компаундом проводится под давлением, отработаны. Рекомендован режим термообработки при температуре 150 °С в течение 6 ч. При таком режиме стеклослюдинитовая лента сохраняет эластичность, а элек-

трическая прочность изоляции после пропитки и запекания выше, чем у нетермообработанной.

Для производства изоляции «Монолит-2» опробован ряд смол и отвердителей, стеклослюдинитовых лент (типа ЛСКН-160ТТ), содержащих ускорители различной реакционной способности и в разном количестве, поэтому режим термообработки изоляции перед пропитками постоянно исследовался и корректировался.

За критерий качества в исследованиях принята кратковременная электрическая прочность $E_{\text{пр}}$. С точки зрения математической статистики электрическая прочность — случайная величина, наиболее полной характеристикой которой является функция ее распределения $f(E_{\text{пр}})$.

Исследования по влиянию режимов термообработки перед пропиткой проводились на нескольких десятках стержней-макетов с толщиной изоляции 2 мм на сторону, изготовленных в лабораторных условиях, с последующей проверкой полученных результатов путем испытаний натурных изделий и нескольких десятков стержней-макетов, изготовленных в производственных условиях вместе с натурными изделиями.

В период применения для пропиток компаундов из смол, представляющих вязкие жидкости: ЭД-20 (ЭД-6), ЭД-16 (ЭД-5), и отвердителей МА (малеиновый ангидрид с $t_{\text{пл}} = 65^\circ\text{C}$), МТГФА (метилтетрагидрофталевый ангидрид с $t_{\text{пл}} = 60^\circ\text{C}$) режим, рекомендованный для изоляции «Монолит», положительно влиял на диэлектрические свойства готовой изоляции ($E_{\text{пр}}$, $\text{tg } \delta$). При переходе на маловязкие компаунды стало существенно сказываться испарение ускорителя из стеклослюдинитовых лент в период термообработки при повышенной температуре.

Результаты исследований показали, что при использовании для пропитки компаунда из смолы DER-330 (США) и отвердителя ГГФА ($t_{\text{пл}} = 36^\circ\text{C}$, Япония) при термообработках изоляции в течение 6 ч при температуре 150°C или 6 ч при температуре 120°C прочность изоляции стержней макетов, содержащих 0,5 % ускорителя ТЭА (триэтаноламин), уменьшается примерно на 19 и 8 % соответственно по сравнению с изоляцией, не прошедшей термообработку перед пропитками (рис. 4.60, а). Такое же снижение электрической прочности происходит в случае пропитки компаундом из жидкой смолы ЭД-22 и жидкого отвердителя ИМТГФА. У изоляции, не прошедшей термообработку, прочность составила 34 кВ/мм, у прошедшей термообработку при температуре 150°C в течение 6 ч — 27 кВ/мм, т.е. снизилась примерно на 18 % (рис. 4.60, б). Проверка на реальных изделиях (стержнях гидрогенератора на напряжение $U_{\text{ном}} = 13,8$ кВ с толщиной изоляции 4 мм на сторону) подтвердила существенную зависимость электрической прочности от режимов термообработки (рис. 4.60, в).

С учетом вышеизложенного режим термообработки обмоток перед пропиткой был сведен к режиму сушки ее от содержащейся влаги при температуре 110°C в течение 6 ч.

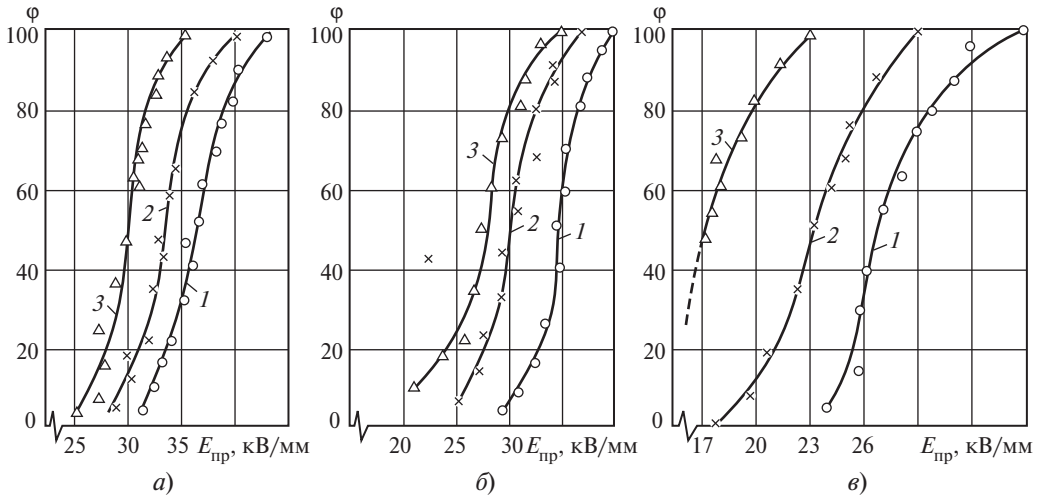


Рис. 4.60. Распределение значений $E_{\text{пр}}$ изоляции «Монолит-2» стержней макетов (а и б) и натуральных стержней (в). Пропитывающие компаунды из смолы DER-330 и отвердителя ГГФА (а) и из смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА (б и в):

1 — изоляция без термообработки перед пропиткой; 2 — изоляция, термообработанная при температуре 120 °С в течение 6 ч; 3 — изоляция, термообработанная при температуре 150 °С в течение 6 ч

Для сокращения режимов запекания изоляции после ее пропитки эпоксидными компаундами вместо ускорителя ТЭА был опробован ускоритель марки УП-606/2, который обладает повышенной реакционной способностью. Но у этого ускорителя есть существенный недостаток — он более летуч по сравнению с ТЭА, и не только при температуре 110 °С, но даже при температуре 55 ± 5 °С и под вакуумом. Результаты по определению летучести ускорителя УП-606/2 из слоев изоляции стержней макетов показали, что при температуре 110 °С в течение 6 ч ускоритель примерно наполовину улетучивался, причем независимо от места расположения слоя ленты в изоляции — будь то нижний, средний или верхний. Примерно 1/3 его остается в ленте после режима вакуумной сушки. Применение лент ЛСКН-160ТТ с ускорителем УП-606/2 с присущим ему недостатком, конечно, усложняло работу, так как практически трудно подобрать заведомо большее его количество в ленте с тем расчетом, чтобы необходимое количество, например, 0,5 или 0,75 % осталось в изоляции после сушки.

В связи с вышеизложенным ускоритель УП-606/2 применяется только в лаке и шпаклевке, используемых для склейки катушек и неизолированных стержней.

Лучшие результаты получаются при применении лент с ускорителем УП-0628, который более реакционноспособен по сравнению с ТЭА и в то же время не испаряется при вакуумной сушке, хотя и склонен к летучести при температурах больше 115 °С.

В слюдинитовой бумаге содержится обычно 0,5—0,7 % воды. Стекланные волокна, из которых выполняются стеклоподложки, обладают ничтожно малой

гигроскопичностью, которая определяется только наличием на их поверхности трещин и неоднородностей, способствующих абсорбции влаги. Как известно, кроме воды, адсорбированной материалом из окружающей атмосферы, диэлектрики, как правило, содержат в своем составе полусвязанную и связанную воду, которая в определенных условиях также влияет на электрические свойства изоляции. Но процесс взаимодействия гидроксильных групп связующего с гидроксильными группами диэлектрика происходит с выделением воды при температуре примерно 600—700 °С.

Известно, что с уменьшением давления температура кипения воды снижается и при вакууме, принятом для технического процесса производства изоляции «Монолит-2» ($0,7 \cdot 10^2$ Па), она составляет примерно 8 °С. Поэтому исследовалась возможность замены термообработки изоляции перед пропиткой на вакуумную сушку. Опыты проводились на стержнях-макетах и натуральных стержнях. Режим сушки и пропитки изоляции стержней по сравнению с изоляцией статорных обмоток асинхронного двигателя (АД) проводится в менее благоприятных условиях: на их изоляцию с перекрытием накладывается слой антиадгезионной технологической пленки из фторопласта-4, в котором на узкой верхней грани стержня делаются прорезы с шагом 50 мм в виде щелей 10×90 мм. Через них в основном происходит и сушка, и пропитка изоляции, в то время как в АД они происходят практически со всей поверхности статорной обмотки. Для большей объективности статистических результатов исследования проводились на изоляции стержней, которые изготавливались в течение года, при этом использовались разные партии стеклослюдинитовой ленты, смолы и отвердителя. Качество сушки оценивалось по сопротивлению непропитанной изоляции, кратковременному пробивному напряжению изоляции после пропитки и запекания, времени жизни изоляции при напряженности электрического поля 10 кВ/мм.

Измерение сопротивления непропитанной изоляции натуральных катушек и стержней показал, что оно колеблется в широких пределах — от единиц до тысяч мегаом и зависит от влажности окружающего воздуха, т.е. от времени изготовления. Значения сопротивлений непропитанной изоляции стержней макетов после изолирования, после увлажнения в камере влажности, после сушки при температуре 110 °С в течение 6 ч и после сушки вакуумом, показывают, что увлажненная изоляция, имевшая сопротивление $R_{из} \leq 1$ МОм, высыхает как при температуре 110 °С в течение 6 ч, так и при вакууме $0,9 \cdot 10^2$ Па, температуре (55 ± 5) °С в течение 2,5—4,0 ч до сопротивлений в $10 \cdot 10^3$ МОм и выше.

В табл. 4.21 приведены результаты исследования сушки изоляции натуральных стержней до пропитки и ее электрические характеристики после пропитки и запекания. Увлажненная непропитанная изоляция после вакуумной сушки при температуре 55 ± 5 °С, вакууме $0,9 \cdot 10^2$ Па за 3—4 ч высыхает и имеет сопротивление $(5 \div 10) \cdot 10^3$ МОм. После пропитки и запекания она имеет высокие пробивные напряжения — от 97 до 140 кВ (при толщине 4 мм на сторону), а время жизни при 10 кВ/мм составило от 120 до 347 ч. На рис. 4.61 приведены графики вакуумной сушки статоров до пропитки.

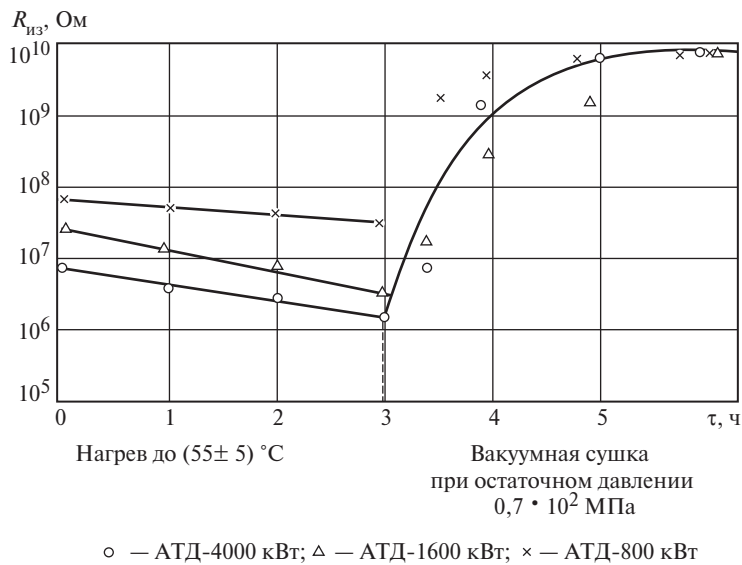


Рис. 4.61. Изменение сопротивлений непропитанных статорных обмоток в процессе разогрева до температуры пропитки и вакуумной сушки

Таблица 4.21

Отработка режимов вакуумной сушки изоляции перед пропиткой

Номер пропитки изоляции стержней гидрогенератора СВ $\frac{712}{224}$ -24 $U_{\text{ном}} = 13,8 \text{ кВ}$	Номер стержня	Сопротивление изоляции стержня до пропитки, МОм						Пробивное напряжение, кВ	Время жизни изоляции при напряженности 10 кВ/мм, ч
		после изолирования	после увлажнения в камере влажности	после сушки в режиме		после вакуумной сушки при $(55 \pm 5) \text{ }^{\circ}\text{C}$			
				100 $^{\circ}\text{C}$ 4 ч	120 $^{\circ}\text{C}$ 6 ч	МОм	Время сушки, час		
48	1158	10 000	16,0	—	—	10 000	6	120	—
	1094	10 000	5,0	—	—	10 000	6	135	—
	122	10 000	1,5	—	—	10 000	6	130	—
	1367	10 000	0,8	—	—	10 000	6	130	—
	1118	10 000	6,0	—	—	10 000	6	137	—
	1319	8000	6,0	—	—	10 000	6	125	—
	1224	10 000	6,0	—	—	10 000	6	95*	150
	1434	10 000	1,5	1000	—	10 000	—	125	—
	1396	7500	8,0	3000	8000	—	—	125	—
	1386	5000	3,0	3000	7500	—	—	135	—
	1453	4500	5,0	5000	8500	—	—	140	—

Окончание табл. 4.21

Номер пропитки изоляции стержней гидрорегенератора СВ $\frac{712}{224}$ -24 $U_{\text{ном}} = 13,8 \text{ кВ}$	Номер стержня	Сопротивление изоляции стержня до пропитки, МОм						Пробивное напряжение, кВ	Время жизни изоляции при напряженности 10 кВ/мм, ч
		после изолирования	после увлажнения в камере влажности	после сушки в режиме		после вакуумной сушки при $(55 \pm 5)^\circ \text{C}$			
				100 °C 4 ч	120 °C 6 ч	МОм	Время сушки, час		
48	1362	6000	8,0	3000	10000	—	—	97*	195
	1162	4000	3,0	2500	5000	—	—	—	—
67	417	4000	11,0	—	—	10 000	4	115	—
	407	1500	2,5	—	—	10 000	4	130	—
	406	1500	2,0	—	—	5000	4	85*	240
	415	3000	17,0	—	—	8000	4	90*	150
	1023	4000	12,0	—	—	10 000	4	92*	230
	447	1250	7,0	—	—	10 000	4	97	—
	648	1250	10,0	—	—	10 000	4	93*	170
	435	3000	18,0	—	—	7000	4	95*	150
	506	3000	2,5	—	—	9000	4	80*	160
	466	2500	6,0	—	—	10 000	4	95*	210
	430	2500	3,0	—	—	5000	4	125	—
	1468	2500	4,0	—	—	10 000	4	130	—
	392	1000	3,0	—	—	7500	4	100*	280
	526	5000	35,0	—	—	10 000	4	95	270
	533	5000	15,0	—	—	8000	4	90	215
	1382	1500	2,5	—	—	5000	4	80	180
98	473	2000	1,5	—	—	5000	3	125	—
	472	8000	1,5	—	—	10 000	3	130	—
	485	1500	1,0	—	—	8000	3	80*	347
	474	2500	0,6	—	—	7000	3	120	—
	467	600	2,0	—	—	10 000	3	90*	240
	531	1200	1,8	—	—	10 000	3	98*	310
	523	900	3,5	—	—	10 000	3	110	—
	484	350	2,5	—	—	8000	3	95*	171
	513	450	2,5	—	—	5000	3	95*	120
	499	350	1,0	—	—	7000	3	85	280

*Пробивное напряжение после длительного электрического старения.

В результате исследований высокотемпературная обработка статорных обмоток до пропитки была заменена на вакуумную сушку при температуре $(55 \pm 5)^\circ\text{C}$, остаточном давлении $0,7 \cdot 10^2$ Па. Такая замена наряду с повышением качества обмоток дает эффект по снижению энерго- и трудозатрат.

4.2.5. Вакуумирование обмотки и пропиточного компаунда, пропитка

Одним из основных условий для равномерной и качественной пропитки обмотки по всему объему является отсутствие в ней газовых включений. Для достижения такого условия, например, применительно к изоляции «Монолит», необходимо продолжительное вакуумирование до 3 ч при остаточном давлении 10^2 Па. Режим вакуумной сушки перед пропиткой обмоток с изоляцией «Монолит-2», для которой используются стеклослюдинитовые ленты той же структуры, что и для изоляции «Монолит», удовлетворяет такому требованию [не менее 3 ч при температуре $(55 \pm 5)^\circ\text{C}$ после достижения остаточного давления $(0,7 \pm \pm 0,2) \cdot 10^2$ Па], и он принят за основу вакуумирования обмотки перед пропиткой.

Отличительной чертой изготовления обмоток с изоляцией «Монолит-2» является необходимость использования больших объемов эпоксидных компаундов (в настоящее время до 50 т), что предъявляет дополнительное требование к вакуумированию обмоток, а более конкретно к процессу заполнения компаундом больших пропиточных камер. В процессе смешивания компонентов компаунда (смолы с отвердителем) и удаления его из пропиточных камер после пропитки под давлением азота возможно насыщение его воздухом или азотом. При заполнении пропиточных камер неотвакумированным компаундом происходит падение вакуума в них и насыщение изоляции газом, что существенно сказывается на свойствах изоляции. При повышении остаточного давления, например, до $4 \cdot 10^2$ Па кратковременная электрическая прочность изоляции снижается до 40 % (рис. 4.62). Диэлектрические потери увеличиваются в 2—3 раза (рис. 4.63).

К процессу вакуумирования компаунда необходимо подходить с определенной осторожностью, так как в его состав входит летучее составляющее — отвердитель, например, ИМТГФА или МГТФА.

На рис. 4.64 и 4.65 приведены результаты определения потерь отвердителей из компаундов, состоящих из смолы DER-330 и одного из отвердителей: ГТФА, МТГФА или ИМТГФА в зависимости от температур и продолжительности вакуумирования. Эпоксидная смола DER-330 имеет незначительные потери в массе при вакуумировании, не превышающие 0,1 %. Как показывают исследования, за 2—3 ч вакуумирования при температуре 60°C из компаунда может улетучиться ИМТГФА до 1,2 %, ГТФА до 2,5 % и МТГФА до 0,8 %. Если одной и той же порцией компаунда провести, например, шесть пропиток, вакуумируя компаунд перед каждой из них при температуре 60°C , то потери отвердителя

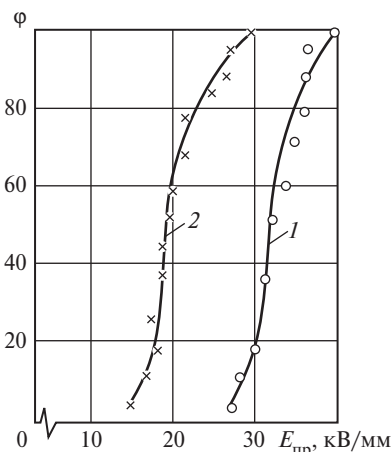


Рис. 4.62. Распределение значений $E_{пр}$ изоляции «Монолит-2» стержней-макетов. Пропитывающий компаунд из смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА:

1 — пропиточные камеры заполнялись предварительно отвакуумированным компаундом и остаточное давление в них сохранялось в пределах $(0,7 \pm 0,2)10^2$ Па; 2 — камеры заполнялись невакуумированным компаундом, остаточное давление поднялось до $4 \cdot 10^2$ Па

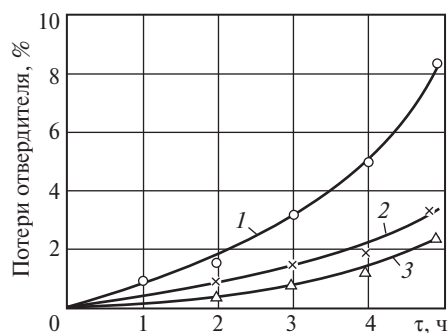


Рис. 4.64. Зависимости потерь отвердителя от времени вакуумирования при температуре 60 °C

1 — из смолы DER-330 и отвердителя ГГФА; 2 — из смолы DER-330 и отвердителя ИМТГФА; 3 — из смолы DER-330 и отвердителя МТГФА

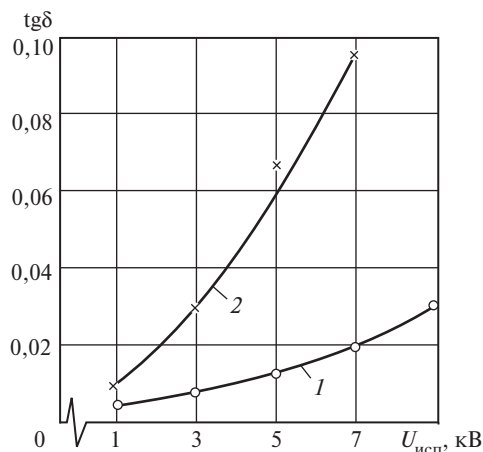


Рис. 4.63. Диэлектрические потери изоляции «Монолит-2» стержней-макетов. Пропитывающий компаунд из смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА:

1 — пропиточные камеры заполнялись предварительно отвакуумированным компаундом и остаточное давление в них сохранялось в пределах $(0,7 \pm 0,2)10^2$ Па; 2 — камеры заполнялись невакуумированным компаундом, остаточное давление поднялось до $4 \cdot 10^2$ Па

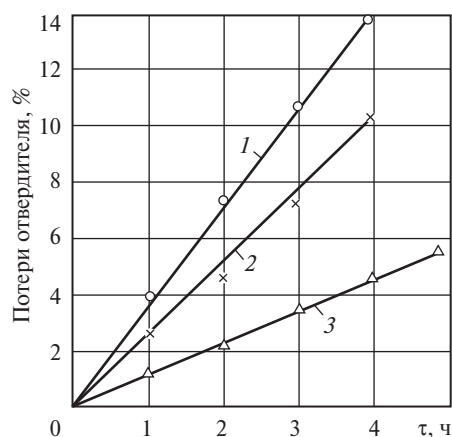


Рис. 4.65. Зависимости потерь отвердителя от продолжительности вакуумировки компаунда при остаточном давлении $15 \cdot 10^2$ Па, умеренном перемешивании 10 об/мин и температуре 80 °C:

1 — из смолы DER-330 и отвердителя ГГФА; 2 — из смолы DER-330 и отвердителя ИМТГФА; 3 — из смолы DER-330 и отвердителя МТГФА

ИМТГФА составят около 7 %. Экспериментально в лабораторных условиях с последующей проверкой в производстве установлено, что для сохранения остаточного давления в пропиточных камерах на требуемом уровне $(0,7 \pm \pm 0,2) \cdot 10^2$ Па в период заполнения их компаундом, достаточно непродолжительной предварительной дегазации его в емкости для хранения при постоянном перемешивании при температуре $(55 \pm 5)^\circ\text{C}$ при остаточном давлении $1,5 \cdot 10^2$ Па в течение 40—60 мин. В первоначальный период дегазации происходит интенсивное пенообразование на поверхности компаунда с последующим существенным его снижением, когда происходит улетучивание отвердителя. Сохранение остаточного давления в пропиточных камерах достигается также при скорости примерно 15 л/мин и способе подачи компаунда в нижнюю точку камеры. При заполнении через верхнюю точку происходит интенсивное испарение отвердителя.

Изоляции «Монолит» и «Монолит-2» не отличаются по своей структуре, так как для обеих применяются пористые сухие стеклослюдинитовые ленты. Расчетное время пропиток для изоляции «Монолит» при условной технологической вязкости компаунда по ВЗ-4, температуре 40°C и остаточном давлении $8 \cdot 10^2$ Па составляют 90 и 140 мин для толщины 2 и 3 мм на сторону.

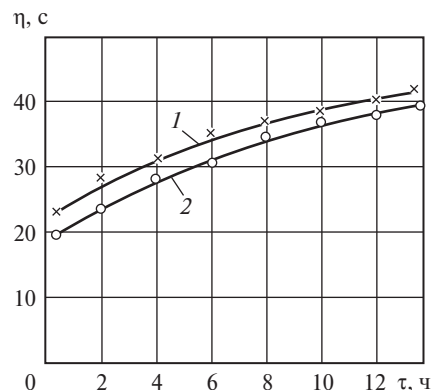
Для натуральных обмоток с изоляцией «Монолит-2» принято время пропиток 120 и 130 мин при толщине изоляции 2 и 3 мм соответственно (см. п. 4.2.3.)

На рис. 4.66 приведена зависимость изменения вязкости эпоксидного компаунда, состоящего из смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА, небольшой массы (примерно 1 кг) в лабораторных условиях, а на рис. 4.67 — при применении его на промышленном участке по пропитке статоров. С учетом этих данных в качестве оптимальной для пропитки принята температура $(55 \pm 5)^\circ\text{C}$, при которой данный компаунд имеет практически неограниченный технологический срок жизни.

В ходе исследований было установлено, что для нагнетательной пропитки необходимы большие объемы эпоксидных компаундов. Для этого установили регламент дегазации компаунда с учетом летучего компонента — отвердителя, входящего в его состав, уточнили скорости и способы заполнения пропиточных камер и обосновали оптимальную рабочую температуру пропиточного компаунда, обеспечивающую поддержание его рабочей вязкости неограниченное время. За рассматриваемый период было пропитано около 200 статоров.

Рис. 4.66. Изменение вязкости компаунда (ЭД-22 плюс ИМТГФА) от времени пребывания при температуре:

1 — 60°C ; 2 — 50°C



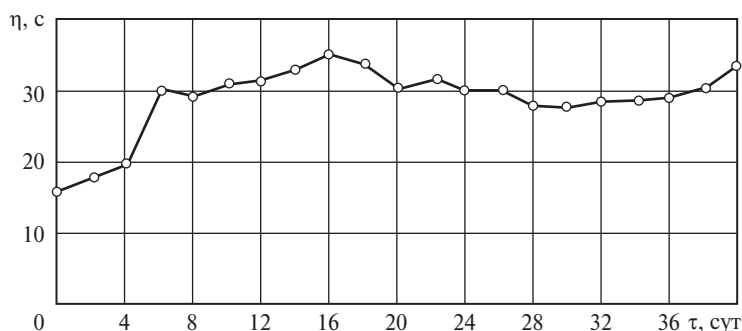


Рис. 4.67. Изменение вязкости компаунда на участке пропитки статоров при температуре $55 \pm 5^\circ\text{C}$

Компаунд состоял из следующих компонентов: смола ЭД-22 (100 ч.) и отвердитель ИМТГФА (80 ч.). За сутки к имеющемуся добавлялось в среднем 7—10 % свежеприготовленного компаунда. Изоляция статорных обмоток выполнялась из ленты ЛСКН-160ТТ, содержащей 0,5 % ускорителя УП-0628.

4.2.6. Отверждение изоляции после пропитки

Свойства отвержденных эпоксидных компаундов зависят от ряда факторов, прежде всего от типов смол, отвердителей, наличия ускорителя и, наконец, от скорости отверждения. В настоящее время только для электротехнических целей используется несколько десятков эпоксидных компаундов различных составов и назначений. Поскольку зависимость между составом, режимом отверждения и свойствами получаемого компаунда недостаточно изучена, обычно условия отверждения компаундов подбираются эмпирически. Практически невозможно обеспечить с помощью выбранного режима отверждения или состава компаунда наличие у него одновременно оптимальных электрических, механических и тепловых свойств.

К эпоксидным компаундам, применяемым для изготовления изоляции «Монолит-2», предъявляют два противоречащих одно другому условия. С одной стороны, требование продолжительного сохранения ими рабочей вязкости при температурах пропитки с тем, чтобы свести к минимуму отходы компаундов, а с другой стороны — быстрого перехода в гелеобразное состояние при выходе на режим запекания, с тем чтобы свести к минимуму вытекание его из обмотки. Первому требованию отвечали компаунды на основе импортных смол DER-330, MER-200 (Япония), отвердителя ГГФА и отечественный компаунд из смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА. Второе требование обеспечивается ускорителем, вводимым в стеклослюдинитовую ленту, и скоростью подъема температуры при выводе статора на режим запекания.

При выборе ускорителя, вводимого в ленту ЛСКН-160ТТ, т.е. в обмотку, по его количественному содержанию и реакционной способности учитывалась термообработка перед пропиткой (см. п. 4.2.4). Известно, что увеличение содержания ускорителя даже до нескольких процентов приводит к снижению электрических

и механических свойств эпоксидных компаундов. Второе обстоятельство, ограничивающее введение ускорителя в ленту ЛСКН-160ТТ в пределах 1 %, — возможность диффузии его из изоляции в компаунд в процессе пропитки, что может резко сократить его технологический срок жизни. Введение непосредственно в компаунд ускорителя, например, УП-0628 в количестве даже 0,1 % сокращает технологический срок его жизни в 10 раз.

Известно, что отверждение эпоксидного компаунда — образование сетчатой структуры молекул — характеризуется скоростью процесса, протекающего во времени. Высокие скорости процесса отверждения могут привести к перенапряжениям отдельных связей в макромолекулах и к повышенной жесткости, что является потенциальным источником трещин в компаунде. Отсюда следует, что снижение скорости, т.е. увеличение продолжительности процесса отверждения, способствует образованию менее склонных к растрескиванию, а поэтому более влагостойких компаундов со стабильными физико-механическими и диэлектрическими свойствами, и обычно стремятся, чтобы скорости подъема температур не превышали 1 °С/мин.

Из сопоставления данных рис. 4.67, очевидно, что применение в изоляции статорных обмоток ускорителя повышенной реакционной способности типа УП-0628 в пределах 0,5 % не сказывается на технологическом сроке жизни эпоксидного компаунда из смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА при 7—10 %-ном ежесуточном его обновлении. Такое обновление компаунда обеспечивается программой пропиток статоров на участке. В качестве оптимального принято 0,5 %-ное содержание ускорителя. Процентное содержание ускорителя относится к массе смолы, необходимой для пропитки. Большее содержание его, например 0,75 %, позволяет снизить температуру запекания до 115 °С, но при этом сокращается технологический срок жизни компаунда на участке пропитки статоров. Результаты исследований позволили выбрать в качестве оптимального режима запекания статоров при использовании в обмотке ускорителя УП-0628 температуру 125 ± 5 °С и продолжительность 15 ч после достижения этой температуры. Применение ускорителя ТЭА требовало большей температуры 150 ± 5 °С и продолжительности запекания в течение не менее 24 ч (рис. 4.68 и 4.69).

Достаточно сложной задачей является обеспечение скорости нагрева статора (обмотки) в пропиточной камере при выводе его на режим запекания традиционным способом нагрева в печах. Проведенное измерение теплового поля камеры со статором показало, что скорость нагрева составляет всего около 0,2 °С/мин, а неравномерность нагрева достигает 20 °С, несмотря на интенсивное перемешивание воздуха в печи. Стремление к максимальной герметизации всего процесса изготовления, в том числе и запекания, требует проведения режима запекания в пропиточных камерах, в которых воздух не перемешивается, так как из-за неравномерности теплового поля отсутствует возможность повысить скорость нагрева. На рис. 4.70 приведены характеристики режимов нагрева, вакуумирования, пропитки и запекания статора АД-2 мощностью 1600 кВт при традиционных тепловых режимах в печах.

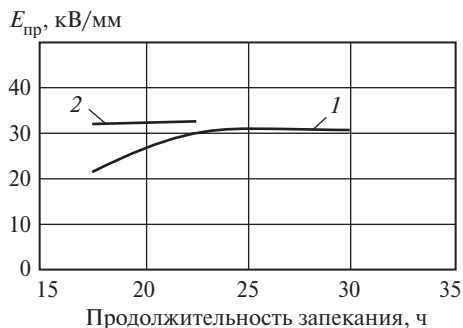


Рис. 4.68. Зависимость $E_{пр}$ от продолжительности запекания при температуре 150 °С изоляции «Монолит-2», пропитывающей компаунд из смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА:

1 — изоляция содержала 0,5 % ускорителя ТЭА; 2 — изоляция содержала 0,5 % ускорителя УП-0628

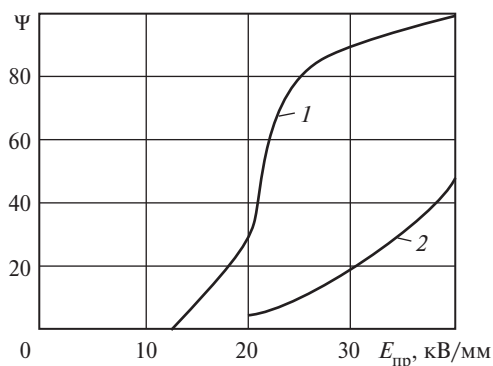


Рис. 4.69. Распределение значений $E_{пр}$ изоляции «Монолит-2», пропитывающей компаунд из смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА. Время отверждения 15 ч при температуре 125 °С:

1 — изоляция содержала 0,5 % ускорителя ТЭА; 2 — изоляция содержала 0,5 % ускорителя УП-0628

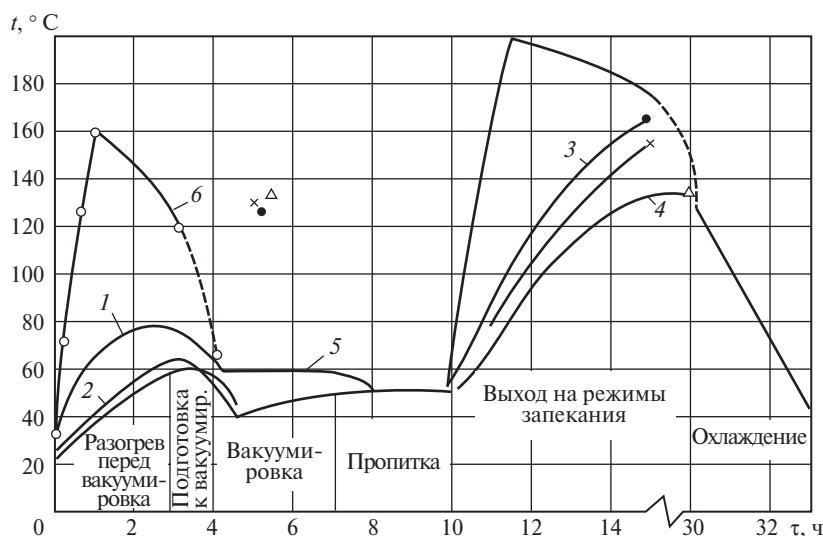


Рис. 4.70. Режимы разогрева, вакуумировки, пропитки и запекания статора АТД-2 мощностью 1600 кВт при традиционном способе проведения тепловых режимов в печах:

1, 2 — температуры меди и изоляции в пазовых частях обмотки; 3, 4 — температуры меди и изоляции в лобовых частях обмотки; 5 — температура пропиточной камеры; 6 — температура воздуха в печи

Предложенная последовательность изготовления статора, когда режимы пропитки и запекания проводятся при полностью выполненной обмотке, позволила исследовать и опробовать в опытно-промышленном производстве более экономичный способ ведения требуемых тепловых режимов путем нагрева постоянным током, пропускаемым по обмотке.

Кроме общеизвестного преимущества — существенного снижения энергозатрат — такой способ позволяет при решении поставленных задач получить следующее: проводить режим разогрева статора непосредственно в пропиточном котле и совместить его с вакуумированием обмотки; использовать для пропитки компаунд с пониженной температурой (30—35 °С) при повышенной температуре обмотки (75 ± 5) °С. Это обеспечивает неограниченный технологический срок жизни компаунда независимо от его обновления и большую скорость пропитки, а также сокращает технологический цикл пропитки и запекания. На рис. 4.71 приведены характеристики вакуумировки режимов пропитки и запекания статора.

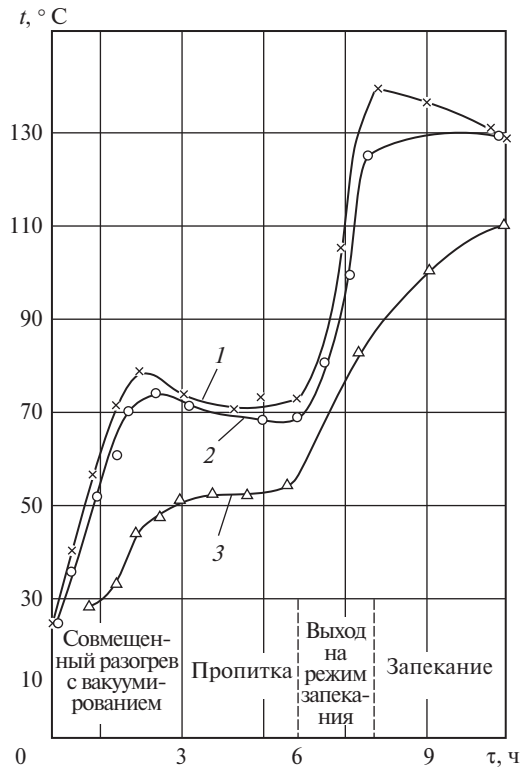


Рис. 4.71. Характеристики режимов вакуумирования, пропитки и запекания статора АТД мощностью 1600 кВт при нагреве постоянным током, пропускаемым по обмотке:

1 — температура изоляции в головке лобовой части обмотки; 2 — температура изоляции в пазовой части обмотки; 3 — температура спинки железа статора

4.2.7. Технология изготовления и технологическое оборудование для изоляции «Монолит-2»

На основе проведенных исследований были разработаны типовые технологические схемы для изготовления изоляции «Монолит-2» катушечных обмоток электрических машин высокого напряжения (рис. 4.72) и стержневых обмоток турбо- и гидрогенераторов (рис. 4.73), типовые технологические инструкции для их изготовления, спроектированы и изготовлены промышленные участки на электромашиностроительных заводах.

Технология для пропитки статоров электрических машин высокого напряжения заключается в следующем. Вначале осуществляется намотка лодочек из провода ПСД и ПЭТВСД. При необходимости витковая изоляция усиливается одним слоем стеклянной, сухой или пропитанной слюдинитовой ленты. Пазовая

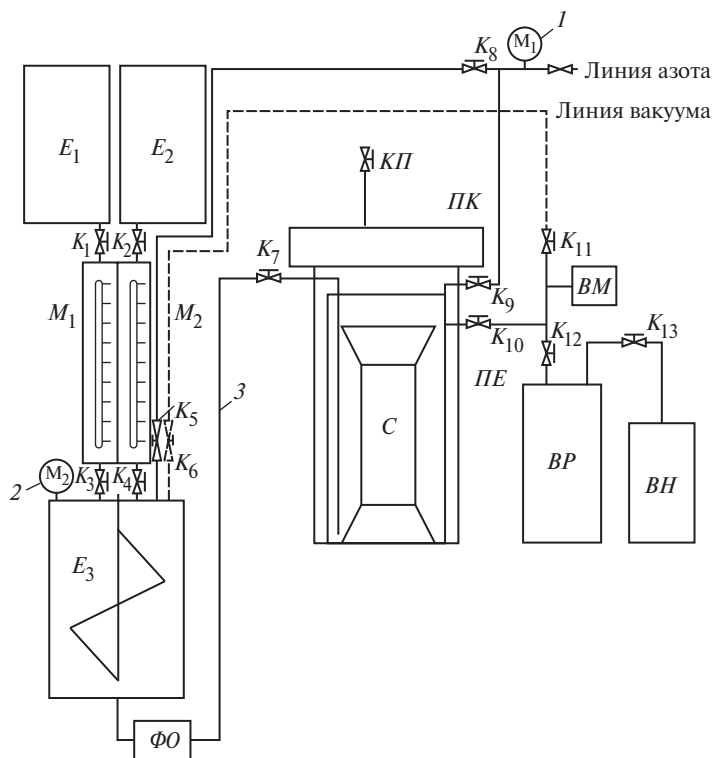


Рис. 4.72. Типовая технологическая схема пропитки статоров электродвигателей:

E_1 — емкость для смолы; E_2 — емкость для отвердителя; E_3 — емкость с мешалкой; M_1 — мерник для смолы; M_2 — мерник для отвердителя; ΦO — фильтр очистки; C — статор машины; BP — вакуумный ресивер; BH — вакуумный насос; BM — вакуумметр Мак-Леода; $KП$ — клапан предохранителя; K_1 — K_{13} — краны; $ПК$ — пропиточный котел; $ПЕ$ — промежуточная емкость; 1, 2 — манометры; 3 — трубопровод для компаунда

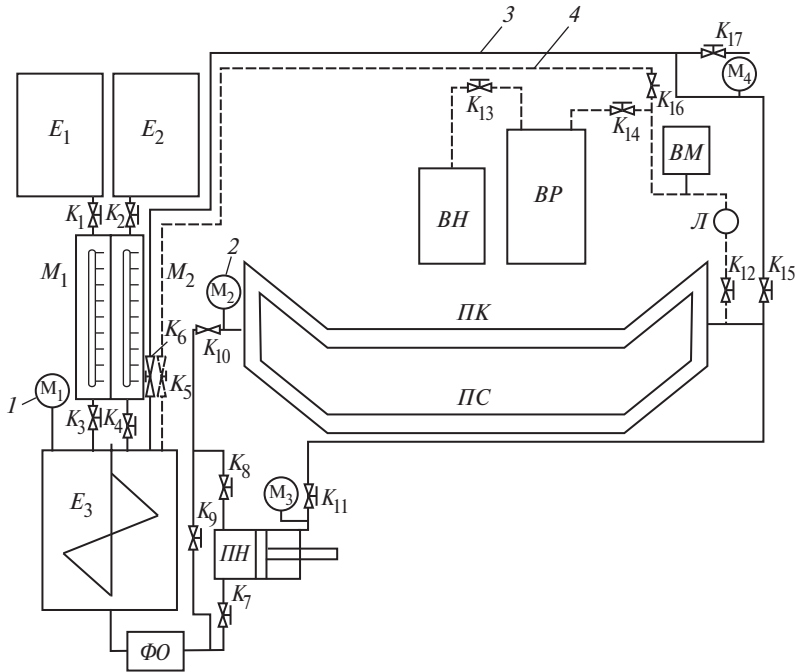


Рис. 4.73. Типовая технологическая схема пропитки стержневых обмоток:

E_1 — емкость для смолы; E_2 — емкость для отвердителя; E_3 — смеситель с мешалкой; M_1 — мерник для смолы; M_2 — мерник для отвердителя; FO — фильтр очистки; $ПН$ — плунжерный насос; $ПК$ — пропиточная коробка; $ПС$ — пакет стержней; $Л$ — ловушка; $ВМ$ — вакуумметр Мак-Леода; $ВР$ — вакуумный ресивер; $ВН$ — вакуумный насос; K_1-K_{17} — краны; 1, 2 — манометры; 3 — линия азота; 4 — линия вакуума

часть промазывается пропиточным компаундом, в который введен ускоритель, и опрессовывается в горячем прессе, где благодаря наличию ускорителя компаунд отверждается в течение 30—40 мин. Подготовленные лодочки растягиваются и формуются на шаблонах в катушки.

После испытаний на отсутствие витковых замыканий на катушки накладывается корпусная изоляция на тех же станках, что и для микалентной компаундированной изоляции.

Конструкции корпусной изоляции в зависимости от мощности электродвигателей приведены в табл. 4.22. Толщина корпусной изоляции «Монолит-2» уменьшена по сравнению с МКИ на 23—30 % для $U_{ном} = 6$ кВ в зависимости от мощности АД. Принятые конструкции витковых и корпусных изоляций позволили существенно увеличить в серии АТД2 заполнение паза медью по сравнению с серией АТД1 (рис. 4.74).

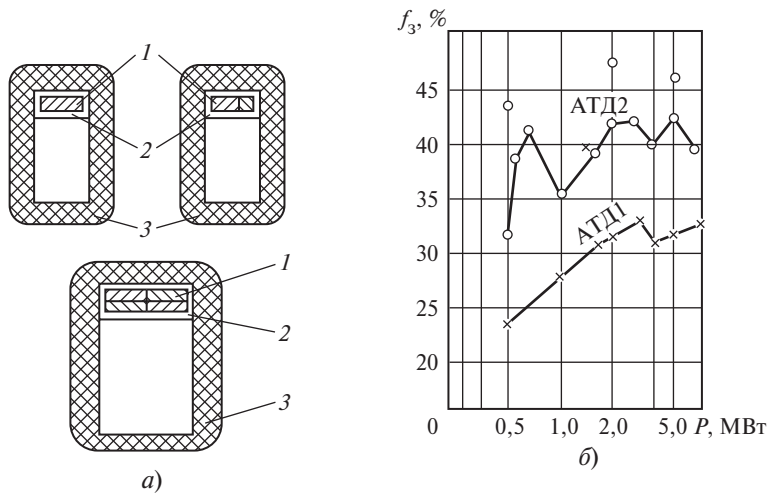


Рис. 4.74. Конструкция изоляции катушек в зависимости от мощности двигателя:
a — конструкция катушки с изоляцией «Монолит-2»; *б* — коэффициент заполнения паза медью f_3 , %; 1 — провод; 2 — витковая изоляция; 3 — корпусная изоляция

Таблица 4.22

Конструкции корпусной изоляции «Монолит-2»

Характеристика	Толщина материала, мм	Количество слоев	Размер корпусной изоляции на две стороны по B и H катушки, мм $U_{ном} = 6$ кВ			
			$P = 1000$ кВт		$P = 1000 \div 5000$ кВт	
			B	H	B	H
Стеклолюдиновая лента ЛСКН-160ТТ 0,13×20 в 1/2 нахлеста	0,13	7	3,64	3,64	—	—
		8	—	—	4,16	4,16
Стеклолента ЛЭС 0,1×20	0,1	1	0,2	0,2	0,2	0,2
Неплотности	—	—	0,3	—	0,3	—
Итого	—	—	4,14	3,84	4,66	4,36

Примечание: Принятые неплотности обеспечивают зазор на укладку в паз.

Коэффициент заполнения паза определяет технико-экономические характеристики машины:

$$f_3 = \frac{q_{\pi} n}{Q_{\pi}},$$

где q_{π} — сечение активной меди (одного провода), мм²; n — число проводников в пазу; Q_{π} — сечение паза в свету.

Значение f может быть рассчитано также по выражению:

$$f_3 = f_m f_{\pi} f_k.$$

Здесь f_m — коэффициент заполнения медью прямоугольника или квадрата, описанного около изолированного проводника

$$f_m = \frac{q_m}{S_m}.$$

Значения S_m находят по формулам в соответствии с рис. 4.75:

для прямоугольника $S_m = (a + 2\delta_{из})(b + 2\delta_{из})$;

для окружности $S_m = (d + 2\delta_{из})^2$;

f_m — один изолированный проводник;

f_{π} — коэффициент заполнения изолированными проводниками свободного пространства паза, определяемый как сумма площади прямоугольников, описанных около изолированных проводников (прямоугольного или круглого сечения):

$$f_{\pi} = \frac{S_m n}{S_{\pi}};$$

S_{π} — площадь поперечного сечения паза в свету за вычетом площадей сечения изоляции от корпуса и клина;

f_k — коэффициент использования паза под укладку обмотки, равный отношению свободного пространства паза под укладку к сечению паза в свету:

$$f_k = \frac{S_{\pi}}{Q_{\pi}}.$$

Несмотря на уменьшение толщины изоляции, полупроводящие покрытия для обмоток на напряжение $U_{ном} = 6$ кВ не применяются. Правомочность такого решения также подтверждена результатами исследований.

Увеличение коэффициента заполнения паза на 1 % приводит к повышению мощности машины на 0,75 %. В табл. 4.23 представлены примерные значения

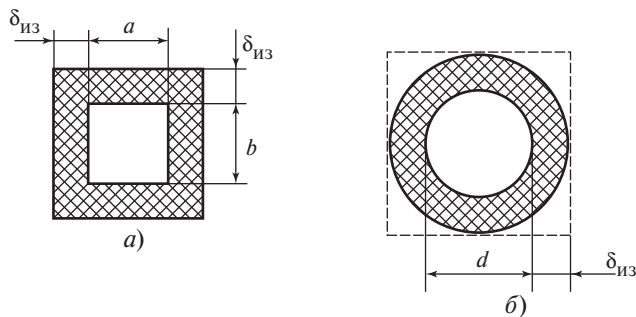


Рис. 4.75. Конструкция проводников прямоугольного (а) и круглого (б) сечения

Таблица 4.23

Примерные коэффициенты заполнения паза

Вид провода	Коэффициент			
	f_m	f_n	f_k	f
Круглый провод для электрических машин на номинальное напряжение до 500 В	0,59	0,7	0,72	0,30
Прямоугольный провод для электрических машин на номинальное напряжение до 3 кВ	0,78	0,7—0,8	0,40—0,60	0,22—0,37
Прямоугольный провод для электрических машин на номинальное напряжение до 6 кВ	0,78	0,6—0,7	0,30—0,45	0,14—0,25

Таблица 4.24

Уменьшение прямолинейных частей катушек в зависимости от мощности двигателя

Уменьшение прямолинейной части катушки (на две стороны) по отношению к общей длине сердечника, %	Мощность, кВт			
	500	800	1600	5000
$2L_n/L_c$	8,0	7,0	5,0	3,5

коэффициентов заполнения паза для различных вариантов электрических машин и обмоточных проводов.

Таким образом, только за счет снижения толщины изоляции удалось существенно увеличить коэффициент заполнения паза и соответственно повысить мощность двигателей с изоляцией «Монолит-2» по сравнению с МКИ.

Корпусная и витковая изоляция, выполненная непропитанными стеклослюдинитовыми лентами, допускает значительно большие деформации, чем МКИ, что позволило сократить прямолинейный вылет катушки из паза от 45 до 25 мм для $U_{ном} = 6$ кВ и тем самым сократить длину прямолинейной части катушек (табл. 4.24).

Изоляция катушек, выполненная из непропитанной стеклослюдинитовой ленты, обладает эластичностью и допускает большие деформации при укладочных работах, при этом даже при укладке последних катушек никакого подогрева не производится. Укладка катушек проводится в сердечник статора вне корпуса, сердечник в процессе укладки легко поворачивается на нужный и удобный угол на резиновых валках с электроприводом; к лобовым частям катушек, в том числе и к их нижним сторонам, имеется свободный доступ; пазовые клинья заклиниваются с существенно меньшими усилиями; допустимо их «дрезание», которое устраняется после пропитки и запекания.

Изолированные катушки статорных обмоток электродвигателей на 6 кВ с МКИ в изоляционно-обмоточном цехе испытывают переменным напряжением 21 кВ частотой 50 Гц в течение 1 мин; после укладки в статор — напряжением 18 кВ. В связи с тем что окончательные электрические свойства термореактивная изоляция «Монолит-2» статорных обмоток приобретает только после про-

питки и запекания, для нее приведенные выше нормы испытательных напряжений совершенно неприемлемы. В то же время на отдельных технологических операциях изготовления статорных обмоток: изолировании, укладке в пазы статора, расклиновке пазовых частей, подрихтовке и бандажировке лобовых частей — возможны грубые нарушения непропитанной изоляции, которые могут стать причиной электрического пробоя после пропитки и запекании обмотки.

При всех ее положительных качествах готовая обмотка с изоляцией «Монолит-2» имеет недостаток: в случае пробоя изоляции сложно выполнить ремонт. Поэтому очень важно проводить предварительные испытания непропитанной изоляции с тем, чтобы по возможности выявить дефекты перед пропиткой и запеканием.

Характерные дефекты, которые могут быть в непропитанной изоляции: несоблюдение нахлеста, повреждение слюдяной бумаги, порезы изоляции в процессе укладки. Кроме того, происходит естественное снижение электрической прочности стеклослюдинитовой ленты в процессе изолирования, изоляции катушек при укладке в статор, расклиновке, подъеме «шаговых» катушек, подрихтовке и бандажировке лобовых частей, изоляции катушек и обмотки в целом при повышенной влажности.

Для обоснования и выбора норм испытательных напряжений были проведены исследования на натурных катушках с изоляцией, выполненной из стеклослюдинитовой ленты марки ЛСКН-160ТТ-0,13×20. Испытания изоляции пазовых частей проводились при длине электрода равной длине сердечника, а испытания изоляции углов перехода от пазовых к лобовым частям — при длине электрода 100 мм. Для определения влияния увлажнения непропитанной изоляции катушки выдерживались в камере влажности в течение суток при температуре 20 °С и относительной влажности 80 и 90 % (в период увлажнения периодически измерялось сопротивление изоляции). Для определения влияния процесса укладки воспроизводились все технологические процессы.

Результаты исследований показали следующее:

- в процессе изолировочных работ, выполняемых вручную и на станках, происходит естественное снижение электрической прочности ленты ЛСКН-160ТТ в среднем на 13 и 18 % исходного состояния соответственно (рис. 4.76, кривые 1, 2, 3);
- электрическая прочность непропитанной корпусной изоляции не одинакова по длине катушки; пробивные напряжения углов перехода от пазовых к лобовым частям в среднем на 15 % ниже, чем в пазовых частях (рис. 4.77, кривые 2 и 5), это объясняется неблагоприятными условиями наложения ленты ЛСКН-160ТТ на углах катушек;
- происходит снижение электрической прочности изоляции в пазовых частях при укладке, заклиновке катушек в пазах; оно в среднем составляет 10 % (рис. 4.78, кривые 1 и 2);
- распределение пробивных напряжений непропитанной изоляции катушек, выполненной шестью слоями в 1/2 нахлеста ленты ЛСКН-160ТТ, происхо-

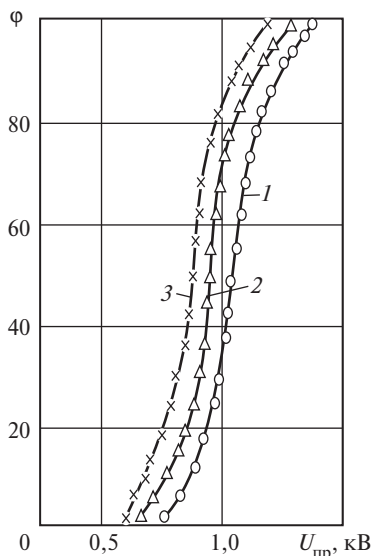


Рис. 4.76. Распределение пробивных напряжений стеклослюдинитовой ленты ЛСКН-160ТТ 0,13×20: 1 — в исходном состоянии; 2 — после ручной изолировки; 3 — после станочной изолировки

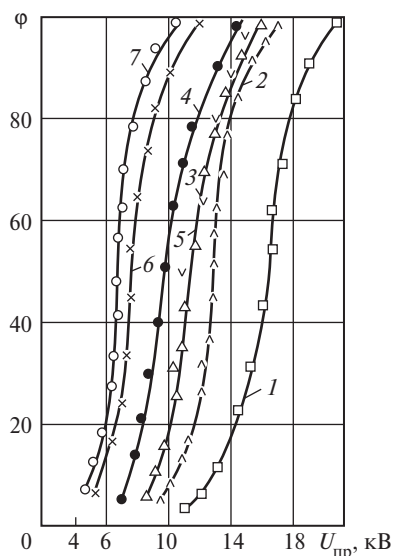


Рис. 4.77. Распределение пробивных напряжений непитанной изоляции катушек, выполненной лентой ЛСКН-160ТТ 0,13×20 в 1/2 нахлеста:

1 — пазовые части, изолированные восемью слоями при относительной влажности 65 %; 2 — пазовые части, изолированные шестью слоями при влажности 65 %; 3 — пазовые части, изолированные шестью слоями при влажности 80 %; 4 — пазовые части, изолированные шестью слоями при влажности 90 %; 5 — углы перехода от пазовых к лобовым частям, изолированных шестью слоями при влажности 65 %; 6 — углы перехода от пазовых к лобовым частям, изолированных шестью слоями при влажности 95 %; 7 — пазовые части, изолированных тремя слоями при влажности 65 %

дит в зависимости от дефектов при подъеме и опускании шаговых катушек при подрихтовке и бандажировке лобовых частей катушек. Снижение составляет 13 % для углов перехода от пазовой к лобовым частям (см. рис. 4.78, кривые 3 и 4);

- если катушки или статорная обмотка до пропитки хранятся в условиях повышенной влажности, то электрическая прочность изоляции может уменьшиться относительно ее значения при нормальных условиях хранения (относительная влажность не превышает 65 %) примерно на 15 и 20 % при 80 и 95 %-ной влажности соответственно (см. рис. 4.77, кривые 3, 4, 6);

- существенно снижается электрическая прочность при повреждении изоляции в виде порезов (рис. 4.79). В намотанном сердечнике порезы, как правило, возможны на выходе из паза.

При выборе испытательных напряжений отдельных катушек исходили из минимальных пробивных напряжений, которые составляют для изоляции, выполненной тремя, шестью и восемью слоями в 1/2 нахлеста 5,5; 9,0 и 11,0 кВ соответственно. В виду того, что целесообразно снизить испытательные напряжения на 15 % (при хранении катушек в условиях влажности до 80 %, чем про-

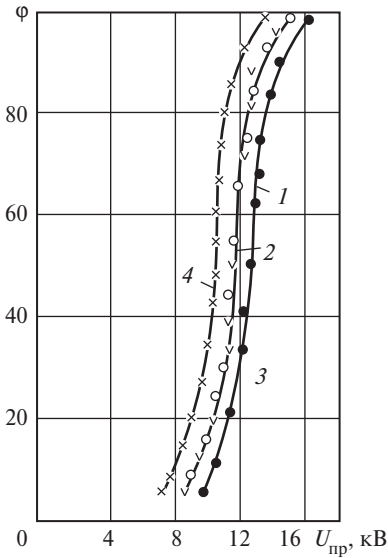


Рис. 4.78. Распределение пробивных напряжений непропитанной изоляции катушек, выполненной шестью слоями в 1/2 нахлеста ленты ЛСКН-160ТТ 0,13×20:

1 — пазовые части в исходном состоянии; 2 — пазовые части после укладки и расклиновки в пазах; 3 — углы перехода от пазовых к лобовым частям в исходном состоянии; 4 — углы перехода от пазовых к лобовым частям после выполнения технологических операций по укладке в сердечник

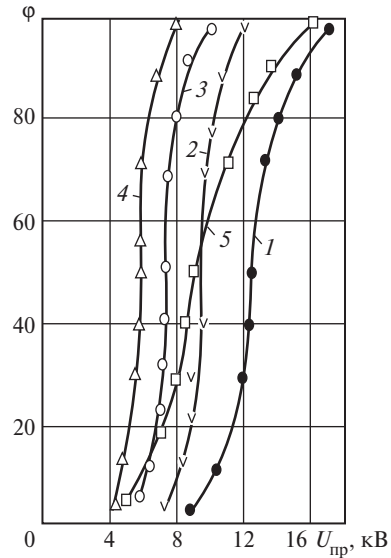


Рис. 4.79. Распределение пробивных напряжений непропитанной изоляции катушек, выполненной шестью слоями в 1/2 нахлеста ленты ЛСКН-160ТТ 0,13×20 в зависимости от дефектов:

1 — изоляция в исходном состоянии; 2 — порез на 0,5 мм; 3 — порез на 1,0 мм; 4 — порез на 1,5 мм; 5 — складки в изоляции

изводить сушку изоляции), они составят 4,7; 7,6 и 9,0 кВ с учетом естественного снижения электрической прочности изоляции катушек при укладочных работах и допустимости испытаний в случае хранения при относительной влажности до 80 %, испытательные напряжения обмоток в целом должны быть снижены на 25—30 % от испытательных напряжений отдельных катушек. Испытательные напряжения изоляции отдельных катушек и статорных обмоток в зависимости от числа слоев ленты ЛСКН-160ТТ описываются эмпирическими формулами:

для катушек

$$U_{\text{исп}} = 4,7 + 0,9(N - 3);$$

для статорных обмоток

$$U_{\text{исп}} = 3 + 0,8(N - 3),$$

где N — число слоев.

Анализ причин пробоя катушек в изоляционно-обмоточном цехе и статорных обмоток в сборочных цехах показывает эффективность принятых испытательных напряжений и в то же время указывает на предельные их значения, так

как при этих же напряжениях пробиваются катушки и статорные обмотки, причины пробоя изоляции которых не установлены.

Подтверждением эффективности выбранных испытательных напряжений является анализ пробоев изоляции в процессе технологических операций на Лысьвенском турбогенераторном заводе: после изолирования было испытано 65 446 катушек и стержней двигателей на напряжение 6 и 10 кВ. При этом было зарегистрировано пробоев с корпусной изоляцией лентой ЛСКН-160ТТ-0,13×20:

В угловой части	274 (0,41 %)
В пазовой части.....	193 (0,29 %)
Витковые замыкания	73 (0,11 %)
Прогар полупроводящего покрытия.....	7 (0,01 %)
Из 1210 статоров с уложенными катушками:	
до пайки после укладки.....	130 (10,74 %)
после пайки	17 (1,4 %)
после пропитки	6 (0,45 %)
витковые замыкания	0

Вязку обмоток проводят лавсановым или стеклянным шнуром. При применении стеклонаполненных шнуров типа ШСЛ большего диаметра отпадает необходимость дистанционных прокладок.

Менее жесткие требования предъявляют к бандажным кольцам, к которым крепятся лобовые части катушек, и к кронштейнам, к которым крепятся бандажные кольца. Если в обмотке с МКИ они несут существенные нагрузки при работе, то для обмоток с изоляцией «Монолит-2» они в основном используются для формообразования корзинки из лобовых частей катушек, поэтому для их изготовления в настоящее время используют стеклопластики.

Перед пайкой схемы обмотки и межкатушечных соединений у каждой катушки проверяется отсутствие витковых замыканий и испытывается корпусная изоляция. Межкатушечные соединения и схема соединения обмотки изолируются теми же марками стеклослюдинитовых лент, которыми выполнена корпусная изоляция катушек.

Способ пропитки обмоток после ее укладки в сердечниках позволил полностью решить задачу закрепления катушек как в пазах, так и в лобовых частях.

При разработке технических требований к нестандартному оборудованию участка и при его изготовлении учитывалось два основных требования:

- возможность обеспечения технологических режимов;
- сведение до минимума контакта работников участка с компаундом и его компонентами, с пропитанными, но не запеченными статорами, выделяющимися парами из рабочих зон.

Схема подготовки и хранения компаунда приведена на рис. 4.80. Баки-термостаты 1 со смолой отвердителем 2 для нагрева смолы и отвердителя снабжены устройством электрообогрева и системой автоматического контроля и регулирования температуры. Баки рассчитаны на рабочее давление $2 \cdot 10^5$ Па.

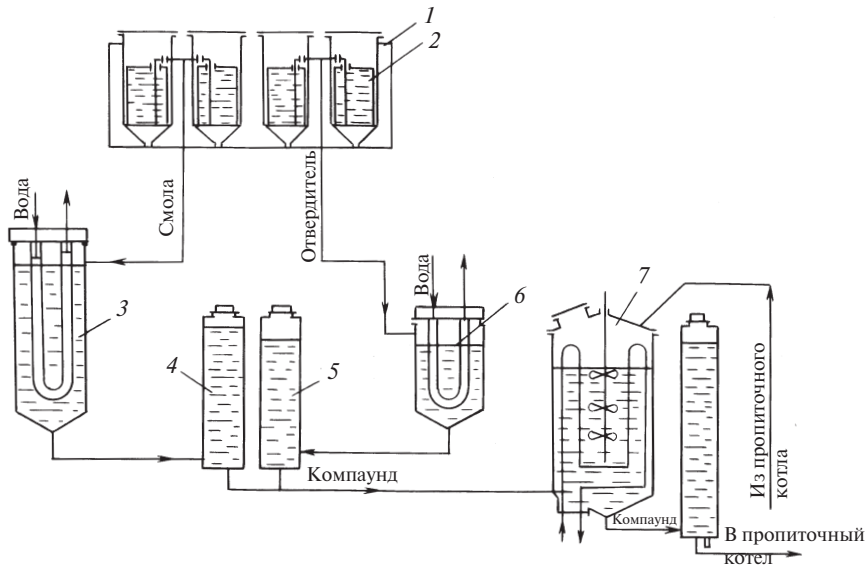


Рис. 4.80. Принципиальная схема приготовления компаунда

Разогретые смолы и отвердители (что необходимо в основном в зимнее время) по трубкам, вставленным через крышки тары до их дна, под давлением азота перепопускаются в баки-нормализаторы 3, 6. Такой способ позволяет свести до минимума контакт персонала со смолой и отвердителем, предотвращает попадание в смолу и отвердитель загрязнений (снега, воды и т.п.), которые находятся на внешней оболочке тары. В баках-нормализаторах, снабженных развитой системой обогрева, температура смолы и отвердителя быстро и равномерно выравнивается по всему объему до $55 \pm 5^\circ\text{C}$. Из баков-нормализаторов смола и отвердитель выкачиваются при остаточном давлении каждый в свою мерную колонку со смотровыми стеклами 4, 5. На смотровые стекла нанесены мерные линейки, по которым можно определить уровни компонентов в баках-нормализаторах.

Как показывает опыт эксплуатации, такой способ дозирования прост в обслуживании, а контроль соотношения смолы и отвердителя в компаунде после проведения очередной дозировки гарантирует нужное количество, а следовательно, и качество компаунда. Мерные колонки снабжены водяными рубашками обогрева. Из мерных колонок под давлением азота смола и отвердитель перегоняются в рабочие баки 7, оборудованные мешалками с электроприводом, развитыми водяными системами обогрева. Баки рассчитаны на избыточное давление до $0,7 \cdot 10^5$ Па и остаточное давление $1,5 \cdot 10^2$ Па. В баках смола и отвердитель тщательно перемешиваются, компаунд вакуумируется.

Из рабочих баков компаунд выкачивается при остаточном давлении в мерную колонку со смотровым стеклом и мерной линейкой и также выкачивается в пропиточную камеру. Оперативное открывание и закрывание задвижек на трубопроводах компонентов и компаундопроводе, создание остаточного давления

и давления в дозировочных колонках осуществляются механизированно с пультов управления, что позволяет оперативно производить операции. Система блокировок предотвращает ошибочные включения, например создание вакуума, когда в сосуде давление и порисходят переливы компонентов и компаунда. В системе компаундопровода встроены сетчатые и магнитные фильтры, через которые пропускается компаунд для очистки от механических примесей. Все трубопроводы компонентов и компаундопроводы снабжены водяными рубашками обогрева. Баки-нормализаторы, мерная и дозировочная колонки, рабочие баки, трубопроводы выполнены из нержавеющей стали для длительной надежной эксплуатации.

Предложенная и реализованная схема приготовления компаунда с использованием для перекачек очищенного сухого азота и вакуума позволяет практически исключить контакт компаунда с воздухом, содержащим влагу.

Схема пропитки приведена на рис. 4.81. Процесс вакуумирования и пропитки статора проводится в четырех вертикальных котлах диаметром 1600—2200 мм и высотой 3000 мм, которые рассчитаны на рабочее давление $12 \cdot 10^5$ Па и способны обеспечивать остаточное давление до $0,1 \cdot 10^3$ Па. Котлы оборудованы системой водяного обогрева, имеют штуцер вакуума, азота и компаундопроводов. Крышки котлов крепятся с помощью болтов, уплотняются резиновой прокладкой многоразового использования.

Сердечник с обмоткой собирают в специальной камере-контейнере (см. рис. 4.81). КERN 5 с опорным нижним кольцом 8 служит основой для всей сборки. Сердечник заводят на кERN и вставляют в нижнее опорное кольцо, сверху его закрывают таким же, но съемным кольцом 4. Камера-контейнер 7 помещается в специальный колодец в вертикальном положении, и в нее вводится кERN с сердечником. На кERN надевается распорное кольцо 3 и крышка камеры 2, которая крепится к камере клиновидными запорами. В собранной камере сердечник с обмоткой от аксиальных перемещений сдерживается распорным кольцом 3, от радиальных — верхним и нижним опорными кольцами 4, 8.

Опорные кольца предохраняют лобовые части обмотки от механических повреждений, центрируют сердечник относительно керна, практически не требуют увеличения диаметра пропиточных камер и тем самым позволяют использовать для их заполнения как можно меньше компаунда. Пустотелый кERN также уменьшает заполняемый объем. Центровка сердечника относительно керна необходима для того, чтобы в процессе поворотов камер при

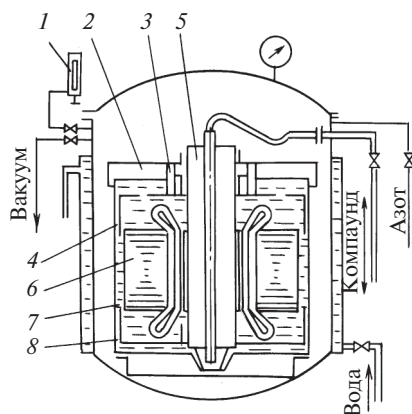


Рис. 4.81. Принципиальная схема пропитки:

1 — вакуумметр Мак-Леода; 2 — крышка камеры-контейнера; 3 — распорное кольцо; 4, 8 — верхние и нижние опорные кольца; 5 — кERN; 6 — сердечник статора с обмоткой; 7 — камера-контейнер

нагреве или запекании в печах сердечник не катался по керну. В противном случае возможно смещение листов шихтованного сердечника и особенно сегментной стали, что приведет к механическому повреждению обмотки. При фиксации сердечника с помощью опорных колец, когда площади опор ограничены и расположены по концам шихтованного сердечника, у последнего может произойти искривление оси. Стремление к сокращению объема компаунда вынуждало, несмотря на отмеченные недостатки, использовать такую конструкцию пропиточных камер.

Исследование и внедрение в производство отечественного эпоксидного компаунда из смолы ЭД-22 и отвердителя ИМТГФА с практически неограниченным технологическим сроком жизни позволяет упростить конструкцию камер, но при этом в 1,5—2,0 раза увеличивается объем компаунда, необходимого для проведения нагнетательной пропитки. В этом случае сердечник набирается в цилиндрический бандаж с горизонтальным разъемом (рис. 4.82). В такой конструкции сердечник 1 по всей длине внешнего диаметра фиксируется продольными ребрами, которые защищают и лобовые части обмотки. Перемещение сердечника в осевом направлении (вдоль бандажа) ограничивается упорами на ребрах. Разъемная конструкция бандажа позволяет набирать и разбирать статор в горизонтальном положении, что весьма существенно, например, при массе статора с обмоткой около 8 т. Пустотелый керн при такой конструкции используется только в период пропитки. Отсутствие керна в расточке и незакрытые опорными кольцами лобовые части обмотки позволяют ускорить прогрев сердечника перед пропитками и вывод его на режим запекания после пропитки, что позволило сократить продолжительность тепловых режимов (разогрева и запекания сердечников) примерно на 10 %.

После прогрева изоляции до температуры $55 \pm 5^\circ\text{C}$ камера ставится в пропиточный котел, в центральное отверстие керна вводится один конец медной трубки, другой конец трубки с помощью накидной гайки присоединяется к штуцеру компаундопровода, расположенному на вертикальной стенке котла.

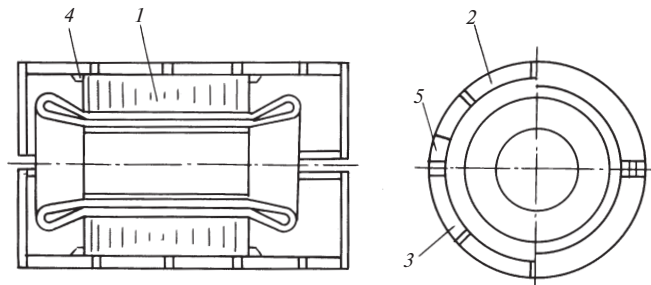


Рис. 4.82. Сердечник статора в бандаже:

1 — сердечник статора; 2 — верхняя половина бандажа; 3 — нижняя половина бандажа; 4 — упор; 5 — клин

Котел закрывается, обмотка вакуумируется при давлении $(0,7 \pm 0,2)10^2$ Па в течение 3 ч и пропиточная камера-контейнер заполняется таким количеством компаунда, чтобы его слой над обмоткой составлял 150—200 мм. В котле создается давление азотом $(10 \pm 2)10^5$ Па, под которым и происходит пропитка. После окончания пропитки достаточно открыть вентиль на компаундопроводе к котлу и весь компаунд под давлением азота передавливается в рабочий бак, в верхнюю его точку.

Вакуумное оборудование позволяет за 10—15 мин создать в котлах остаточное давление $(0,7 \pm 0,2)10^2$ Па. С помощью ресивера давление азота в котле создается за 3—5 мин. Для измерения вакуума используется вакуумметр Мак-Леода с пределами измерений $(3 \div 0,1)10^5$ Па.

Предложенный и реализованный способ пропитки в котлах, в специальных камерах-контейнерах является надежным и высокопроизводительным, при котором до минимума сведены подготовительные операции, и в то же время он по-прежнему «закрытый», т.е. обслуживающий персонал не соприкасается непосредственно с компаундом и его компонентами.

Вакуумное оборудование на участке состоит из двух индивидуальных систем: одна для дегазации компаунда, управления дозировочными и мерными колонками, другая — для вакуумирования изоляции. Для улавливания паров компаунда и воды в вакуумные магистрали врезаны конденсационные колонки, охлаждаемые водой. Для создания вакуума используются ротационные насосы марки ВН производительностью 9300 л/мин и выше, с предельным давлением $0,1 \cdot 10^2$ Па.

Оборудование для запекания и прогрева статоров перед пропитками состоит из проходной конвейерной печи и печей с выкатными тележками. В первой запекаются сердечники двигателей мощностью до 1600 кВт включительно, т.е. изготавливаемые в больших количествах; во вторых — индивидуальные. Печи оборудованы калориферными системами обогрева, где воздух вентиляторами прогоняется через нагревательные элементы и через термостат. Каждый калорифер оборудован автоматической системой регулирования и записи заданной температуры. Загрузочные и разгрузочные отсеки конвейерной печи, печей с выкатными тележками оборудованы системами вентиляции.

Как показывает практика многолетней эксплуатации, конвейерная печь высокопроизводительна, занимает небольшую производственную площадь. Одновременно в ней можно запекать до семи сердечников. Способ передвижения камер-контейнеров с помощью двух непрерывных цепей позволяет производить вращательно-поступательное движение или вращение по заданному режиму. Сигнализация печи показывает количество камер, находящихся в ней, и место их расположения. Нагреватели калориферов — выемные, поэтому легко демонтируются. Индивидуальные печи также снабжены поворотными устройствами. На рис. 4.83 и 4.84 приведены пропитанные и отвержденные статоры с изоляцией «Монолит-2».

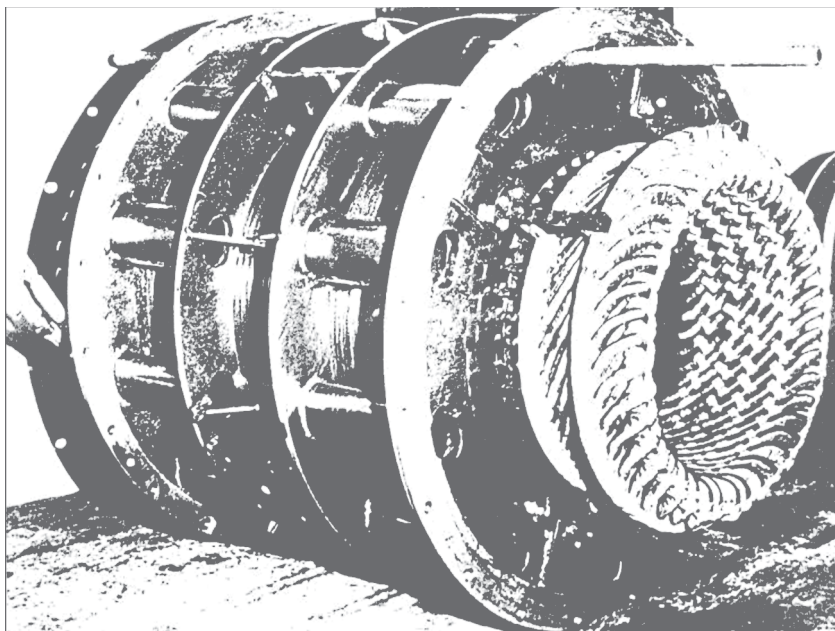


Рис. 4.83. Пропитанный статор АТД с изоляцией «Монолит-2»

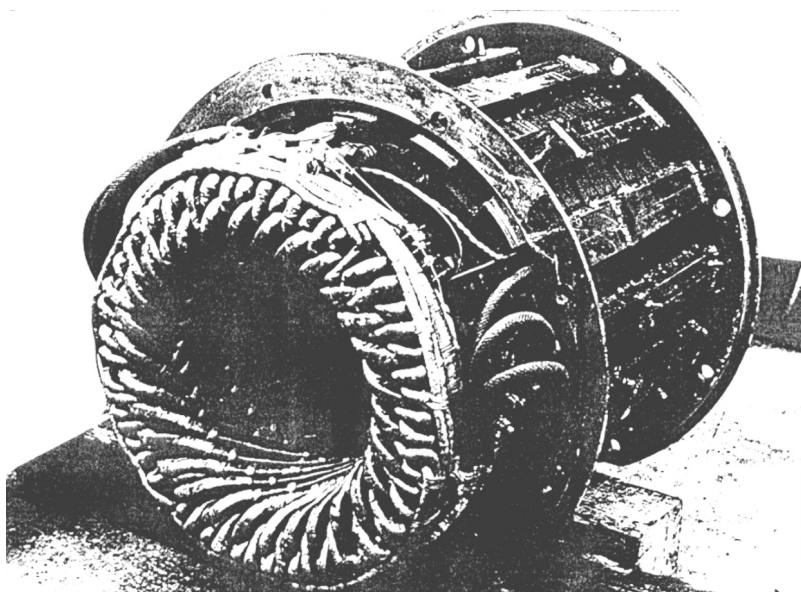


Рис. 4.84. Пропитанный статор ДАЗО с изоляцией «Монолит-2»

Технология изготовления стержневых обмоток заключается в следующем. Собранные заготовки стержней в пазовой части промазываются пропиточным компаундом, содержащим ускоритель, после чего изолируются фторопластовой пленкой, формуются и отверждаются в прессе. Затем на шаблоне выгибаются лобовые части, которые также промазываются компаундом, и в шаблоне током проводится запекание лобовых частей. Готовые стержни на обмоточно-изолирующих станках изолируются сухими стеклослюдинитовыми лентами, число слоев определяется толщиной изоляции, которая зависит от мощности и напряжения генераторов.

Изолированные стержни проходят сушку в термостате при температуре 120—140 °С в течение 6—8 ч. После сушки стержни изолируются фторопластовой пленкой и на пазовые части надеваются пресс-планки, обеспечивающие требуемые геометрические размеры стержня после отверждения изоляции. Стержни гидрогенераторов с пресс-планками укладывают в кассету (рис. 4.85, 4.86), представляющую собой металлическую плиту, на которую с двух сторон крепятся стержни, остальное свободное место заполняется силуминовыми вставками. Уложенные на кассету стержни расклиниваются специальными клиньями до закрытия пресс-планок. На лобовых частях стержней имеются специальные устройства, фиксирующие необходимую конфигурацию стержней. Кассета с уложенными стержнями помещается в прямоугольную пропиточную коробку.

Конфигурация стержней турбогенератора значительно отличается от стержней гидрогенератора. Это вызвано разницей диаметров расточек генераторов. Поэтому необходимо было изготовить такую кассету или форму, чтобы она давала возможность пропитать стержни турбогенератора. Было предложено пропиточную коробку сделать по форме стержней, а укладку стержней производить на основании коробки, представляющей собой в пазовой части сектор, диаметр которого равен диаметру статора генератора (рис. 4.87 и 4.88). В этом случае пазовые части стержней располагают по диаметру, а лобовые части укладывают параллельно, т.е. как в обмотке генератора.

Уложенные таким образом стержни уплотняют и закрывают крышкой. Пропиточные коробки закатывают в термостат, где разогревают до температуры пропитки 60—70 °С. Разогретую коробку вакуумируют при остаточном давлении $(3,13 \pm 0,65) 10^2$ Па. Под вакуумом из смесителя подается разогретый пропиточный компаунд, рабочая вязкость которого не должна быть выше 40 с по ВЗ-4 (компаунд готовится так же, как для пропитки статора).

Когда пропиточный компаунд появляется в ловушке, вакуумный насос отключается, перекрываются соответствующие краны и плунжерным насосом создается давление $(8 \div 10) 10^5$ Па. При этом давлении и температуре 60—70 °С стержни пропитываются в течение 3—4 ч. Затем под вакуумом или при небольшом избыточном давлении компаунд перекачивается в смеситель. Пропиточная коробка в термостате разогревается до температуры 120—150 °С, и стержни

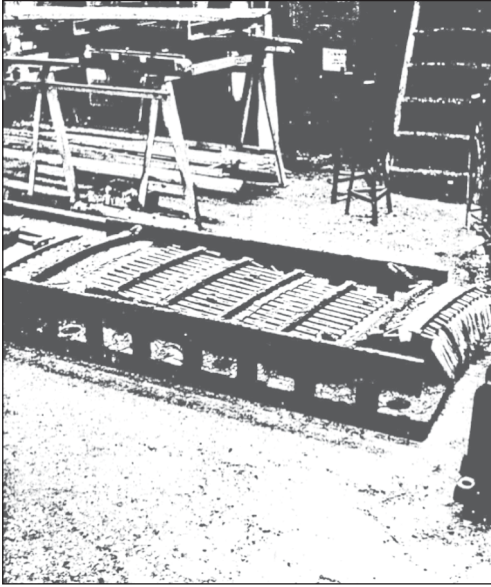


Рис. 4.85. Стержни генератора в пропиточной кассете перед загрузкой в пропиточную коробку

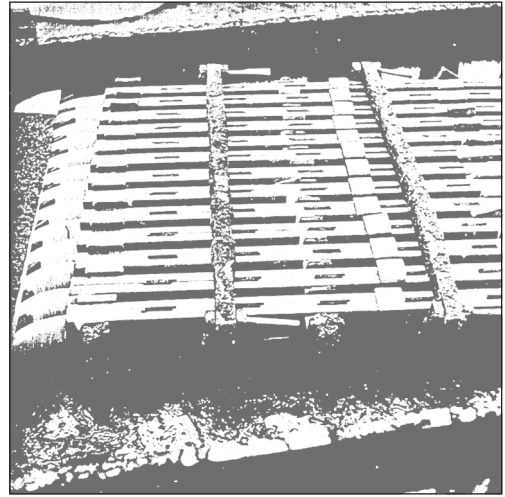


Рис. 4.86. Стержни гидрогенератора, сборка и расклиновка в пропиточной кассете

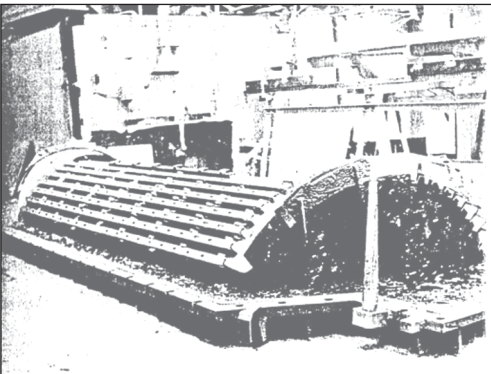


Рис. 4.87. Стержни турбогенератора, размещенные в пропиточной коробке перед пропиткой



Рис. 4.88. Лобовые части стержней турбогенератора, сборка и расклиновка в пропиточной коробке

обрабатываются 15—30 ч. После термообработки пропиточные коробки охлаждаются, разбираются, стержни извлекаются и проходят контрольные испытания. Таким образом, для изоляции «Монолит-2» основные параметры технологических режимов и применяемые материалы были выбраны аналогично технологии изготовления изоляции «Монолит». Основное отличие состоит в том, что термообработка изоляции «Монолит-2» ведется без давления пропиточного состава, что существенно упрощает технологический процесс и позволяет изготавливать изоляцию катушечных обмоток электрических машин и стерж-

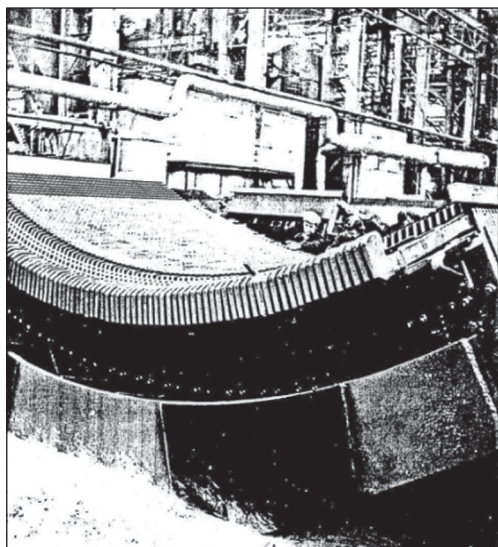


Рис. 4.89. Часть статора гидрогенератора мощностью 320 МВт на номинальное напряжение 15,75 кВ для Токтогульской ГЭС

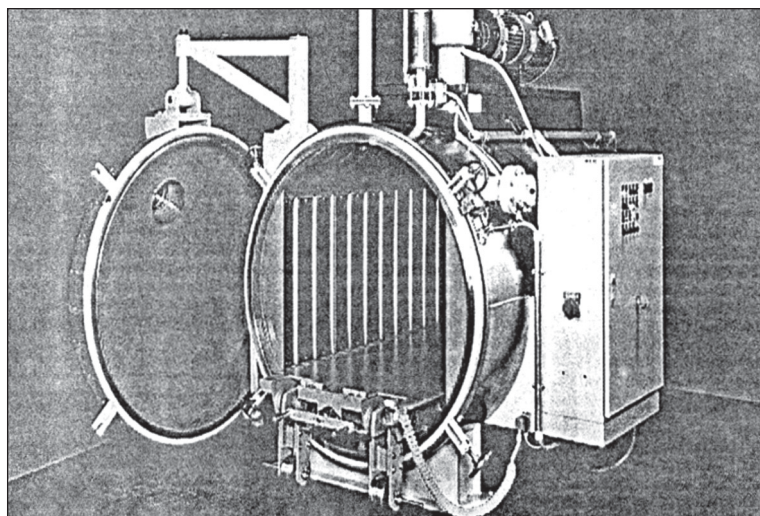


Рис. 4.90. Пропиточная установка для вакуум-нагнетательной пропитки

невых обмоток турбогенераторов высокого напряжения. На рис. 4.89 показаны готовые обмотки с изоляцией «Монолит-2».

Учитывая высокие электрофизические и механические характеристики, полученные при пропитке изоляции по типу «Монолит-2», ведущие фирмы переходят на полную пропитку обмоток не только машин высокого давления, но и турбогенераторов целиком. Особенно это характерно для турбогенераторов воздушного охлаждения, для которых важное значение имеет высокая теплопроводность системы изоляции, изготавливаемой методом вакуум-нагнетательной пропитки. Так на заводе «Электросила» последние 10 лет пропитывают турбогенераторы мощностью от 6 до 160 МВт и в ближайшей перспективе рассматривается возможность изготовления турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью до 300 МВт на напряжение 20 кВ. Причем в этом случае для пропитки используют компаунд ПК-11 в количестве 45 т. В связи с тем, что пропитки проводятся редко и обновление компаунда минимально, компаунд после каждой пропитки охлаждается при помощи специальной установки. На рис. 4.90 представлена современная пропиточная установка для вакуум-нагнетательной пропитки.

4.2.8. Свойства изоляции «Монолит-2»

Изоляция «Монолит-2» разрабатывалась для катушечных обмоток двигателей на напряжение 6—10 кВ мощностью от 100 до 12 000 кВт. Известно, что изоляция этих двигателей подвергается большим нагрузкам, которые возникают непосредственно при пусках. Статорные обмотки двигателей выполняются из шаблонных катушек. При укладке катушки подвергаются значительным деформациям, особенно так называемые шаговые секции. Поэтому для таких обмоток необходимо иметь катушки, изоляция которых обладала бы большой эластичностью и допускала значительные деформации без снижения свойств. Эти условия можно выполнить при изолировании катушек сухими непропитанными слюдо-содержащими лентами с укладкой их в статор и последующей пропиткой целиком обмотанного статора эпоксидным компаундом под вакуумом и давлением.

Первые же опыты, проведенные при разработке изоляции «Монолит-2» и выполненные испытания на натуральных катушках, показали, что разработанная технология не только обеспечивает получение высоких электрических характеристик корпусной изоляции, но и значительно повышает электрические характеристики витковой изоляции обмоток, выполненных из проводов ПСД и ПЭТВСД. При применении в качестве витковой изоляции сухих стеклослюда-содержащих лент толщиной 0,09 мм при двусторонней толщине 0,4 мм пробивное напряжение между двумя витками составило от 9,5 до 18,5 кВ, что в 2,0—2,5 раза повышает свойства серийно выполняемой витковой изоляции из микаленты.

На рис. 4.91 приведены сравнительные результаты определения пробивного напряжения витковой изоляции макетов катушек, выполненных из проводов ПСД и ПЭТВСД без пропитки и с пропиткой по технологии «Монолит-2». Исследование изоляции проводилось как в исходном состоянии, так и после различных воздействий температуры и влажности. Результаты испытаний показывают, что пропитка эпоксидным компаундом под вакуумом и давлением собственной изоляции проводов ПСД и ПЭТВСД увеличивает электрическую прочность в 5—6 раз для ПСД и более чем в 2 раза для ПЭТВСД. Опробование технологии «Монолит-2» для изготовления стержневых обмоток гидрогенераторов, турбогенераторов также показало преимущества изоляции «Монолит-2» перед применяемой для этих обмоток микалентной компаундированной изоляцией. Поэтому дальнейшие исследования изоляции «Монолит-2» проводились на натурных стержнях гидрогенератора и катушечных обмоток электродвигателей высокого напряжения.

Определение характеристик изоляции «Монолит-2» проводилось на стержнях гидрогенератора мощностью 57 МВт напряжением 10,5 кВ для Саратовской ГЭС. Стержни были выполнены из провода марки ПСД сечением $2,26 \times 8$ мм, сечение неизолированного стержня составляло $17,5 \times 54,2$ мм, толщина изоляции 3,5—4,0 мм на сторону, длина пазовой части 110 мм.

Пробивное напряжение изоляции определялось при плавном подъеме напряжения со скоростью 2 кВ/с при температуре 20 °С в трансформаторном масле. В качестве электродов применялась алюминиевая фольга, длина электрода соответствовала пазовой части стержня.

Результаты, приведенные в табл. 4.25, показывают, что пробивное напряжение стержней гидрогенератора с изоляцией «Монолит-2» составляет 87—101 кВ при среднем значении 94 кВ. Изоляция «Монолит-2» имеет более стабильные

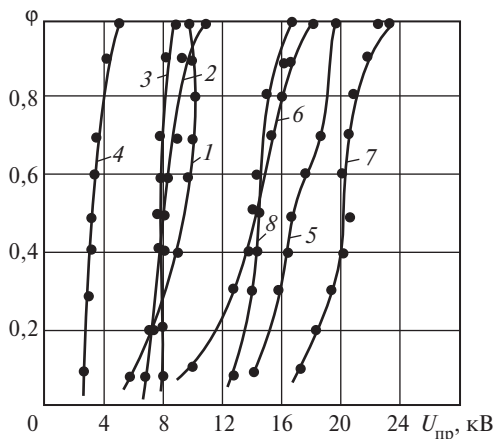


Рис. 4.91. Распределение значений пробивного напряжения макетов и провода ПЭТВСД:

1—4 — не пропитаны; 5—8 — пропитаны по технологии «Монолит-2»; 1, 5 — исходное состояние; 2—6 — пропитаны при температуре 150 °С; 3, 7 — после выдержки в течение 5 сут в среднем и относительной влажности 97 ± 3 %; 4, 8 — после выдержки в течение 10 сут при температуре 220 °С

Таблица 4.25

Значения пробивного напряжения изоляции стержней

Тип изоляции	Пробивное напряжение, кВ									
«Монолит-2»	98	87	96	95	101	100	91	93	89	96
Микалентная компаундированная	73	54	57	62	60	50	66	61	66	70

значения электрической прочности, чем микалентная компаундированная изоляция. Электрическая прочность изоляции «Монолит-2» в 1,4—1,7 раза превышает значение $E_{пр}$ микалентной компаундированной изоляции.

На рис. 4.92 приведены кривые распределения времени жизни при напряжении 25 кВ изоляций «Монолит-2» и МКИ толщиной 3 мм. Результаты испытаний показывают, что изоляция «Монолит-2» обладает большей стойкостью к действию сильного электрического поля, чем микалентная компаундированная изоляция. На рис. 4.93 приведены зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от температуры изоляции «Монолит-2» стержней гидрогенератора Саратовской ГЭС. Значение $\operatorname{tg} \delta$ для изоляции «Монолит-2» при температуре 20 °С составляет 0,03, а при темпера-

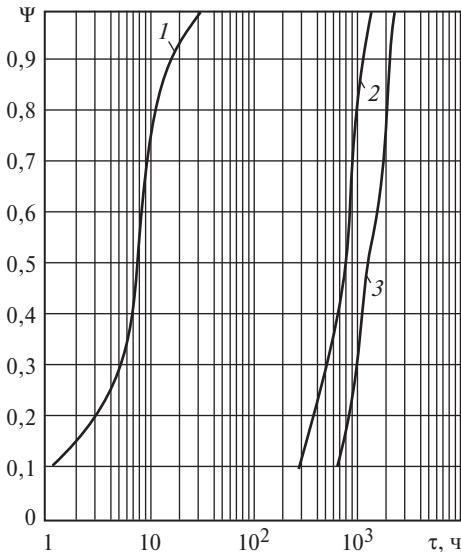


Рис. 4.92. Распределение значений времени жизни изоляции при разных напряженностях электрического поля:

1 — микалентная изоляция, толщина 3 мм, $E_{исп} = 8,3$ кВ/мм; 2 — изоляция «Монолит-2», толщина 3 мм, $E_{исп} = 8,3$ кВ/мм; 3 — изоляция «Монолит-2», толщина 2 мм, $E_{исп} = 12$ кВ/мм

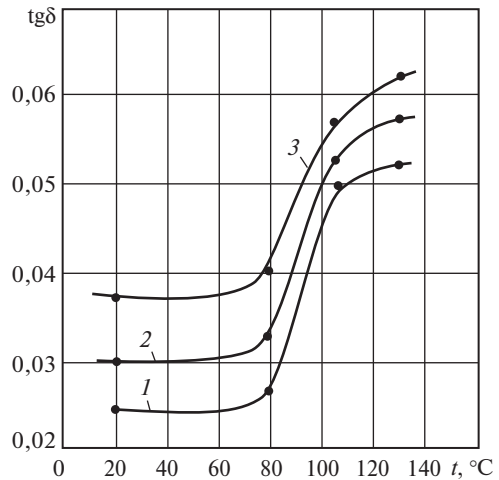


Рис. 4.93. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры изоляции «Монолит-2» стержней гидрогенератора:

1 — при напряжении $0,5U_{ном}$; 2 — при напряжении $U_{ном}$; 3 — при напряжении $1,5U_{ном}$

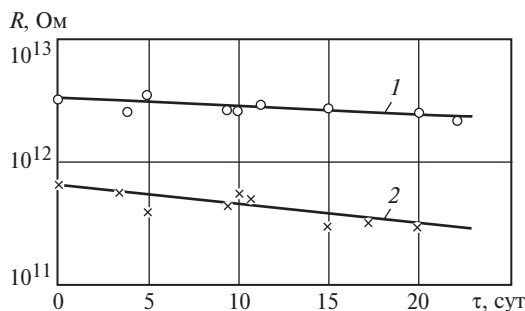


Рис. 4.94. Зависимость сопротивления изоляции стержней гидрогенератора от времени выдержки в воде:

1 — «Монолит-2»; 2 — микалентная компаундированная изоляция

туре 130 °С — 0,06, т.е. изоляция «Монолит-2» имеет меньшие значения $\operatorname{tg} \delta$, особенно при рабочей температуре, чем микалентная компаундированная изоляция. Увеличение значения $\operatorname{tg} \delta$ при изменении напряжения от 0,5 до $1,5U_{\text{ном}}$ (5—15 кВ) при температурах от 20 до 130 °С составляет 0,01—0,015.

Для определения сравнительной водостойкости микалентной компаундированной изоляции и изоляции «Монолит-2» отрезки стержней гидрогенератора длиной 400 мм были погружены в воду и периодически измерялось сопротивление изоляции. На рис. 4.94 приведены кривые зависимости сопротивления изоляции этих стержней от времени пребывания в воде.

После пребывания в течение 20 сут в воде сопротивление изоляции стержней практически не изменилось и составило примерно $(1 \div 2)10^{12}$ Ом для изоляции «Монолит-2» и $(2 \div 3)10^{11}$ Ом для микалентной компаундированной изоляции.

В табл. 4.26 приведены значения основных механических характеристик изоляции «Монолит-2» и микалентной компаундированной изоляции, которые определены на стержнях гидрогенератора для Саратовской ГЭС. Предельным считался прогиб стержня, при котором его пробивное напряжение уменьшилось до 24 кВ. По результатам этих испытаний определялись жесткость стержней EJ , модуль упругости, изгибающие усилие и относительная деформация ε при предельном изгибе. Определение этих характеристик проводилось при комнатной и рабочей температурах для каждого типа изоляции:

$$EJ = \frac{Pl^3}{488};$$

$$\varepsilon = \frac{6h\delta}{l^2},$$

Таблица 4.26

Механические характеристики изоляции «Монолит-2» и микалентной компаундированной изоляции стержней при разных температурах

Характеристика	«Монолит-2»			Микалентная компаундированная изоляция		
	–50 °С	20 °С	130 °С	–55 °С	20 °С	105 °С
Предельный прогиб, мм	7,0—9,5	2—4	6—7	5—19	6—10	30
Усилие при предельном прогибе, 10^3 Н	24—27	16—22	14,5—21,0	9,1—10,0	6,0—9,5	3,75—4,0
Жесткость стержней, 10^2 Н/м ²	11—14	7—11	6	1,4—3,2	1—3	0,9
Модуль упругости, 10^2 Н/м ²	—	1,1—2,5	4,2—6,3	—	4,2—12,0	—
Напряжение сдвига изоляции, 10^{-3} Н/м ²	—	52	32	—	2,0—3,5	0,2
Предел прочности при растяжении, Н/м ²	—	1,02	0,575	—	0,35	0,043

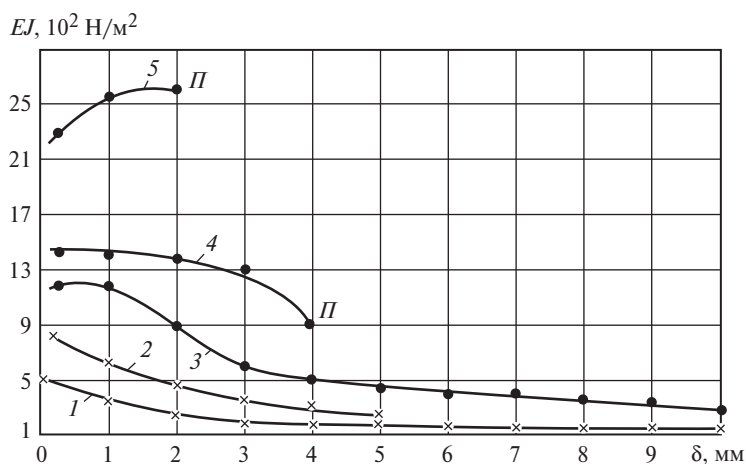


Рис. 4.95. Зависимость жесткости стержней от прогиба при температуре 20 °С:

1 — стержень после удаления МКИ; 2 — стержень с МКИ; 3 — стержень после удаления изоляции «Монолита-2»; 4, 5 — стержень с изоляцией «Монолит-2»; П — пробой изоляции

где P — изгибающая сила, Н; l — расстояние между опорами, см; δ — прогиб, см; h — ширина макета, см.

Полученные результаты (рис. 4.95, 4.96) показывают, что хотя стержни с изоляцией «Монолит-2» допускают меньшие деформации, чем стержни с микалентной компаундированной изоляцией, однако для нарушения целостности их изоляции требуются значительно бóльшие усилия. При предельных для микалентной компаундированной изоляции изгибающих усилиях значения деформа-

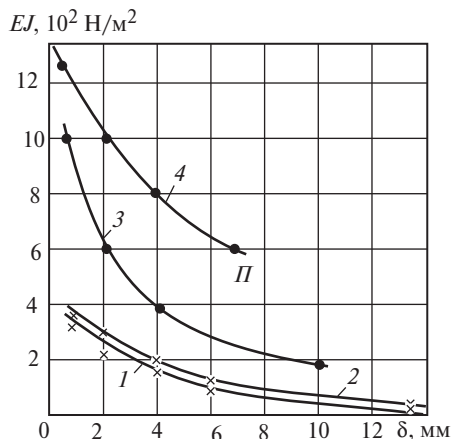


Рис. 4.96. Зависимость жесткости стержней с МКИ при температуре 105 °С и изоляцией «Монолит-2» при температуре 130 °С от прогиба:

1 — стержень после удаления МКИ; 2 — стержень с МКИ; 3 — стержень после удаления изоляции «Монолит-2»; 4 — стержень с изоляцией «Монолит-2»; П — пробой изоляции

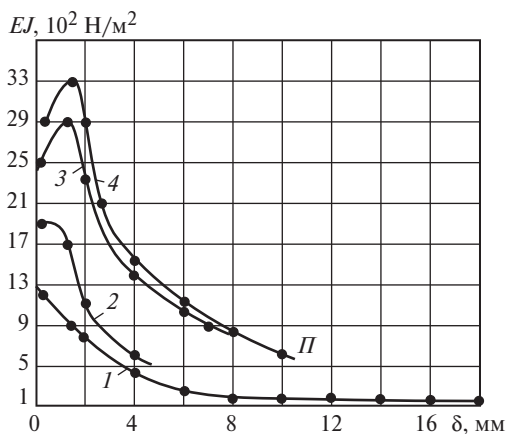


Рис. 4.97. Зависимость жесткости стержней при температуре -50 °С от прогиба:

1 — стержень после удаления МКИ; 2 — стержень с МКИ; 3 — стержень после удаления изоляции «Монолит-2»; 4 — стержни с изоляцией «Монолит-2»; П — пробой изоляции

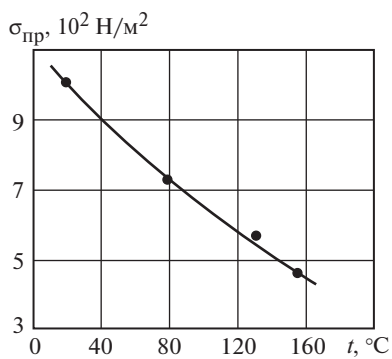


Рис. 4.98. Зависимость предела прочности при растяжении от температуры изоляции «Монолит-2»

ции стержней с изоляцией «Монолит-2» малы и практически безвредны для этой изоляции.

Для определения влияния низких температур на изоляцию отрезки стержней в течение пяти циклов выдерживались при температуре -50 °С в течение 9 ч, а затем при температуре 15—18 °С в течение 15 ч. Предельный прогиб определялся непосредственно после извлечения стержней из холодакамеры. Так же как при комнатной температуре, при температуре -50 °С для разрушения изоляции «Монолит-2» к стержням было приложено значительно большее (в 2,0—2,5 раза) усилие, чем для разрушения МКИ (рис. 4.97).

Данные, приведенные в табл. 4.26, показывают, что изоляция «Монолит-2» обладает большими значениями модуля упругости, чем микалентная компаундированная изоляция. Поскольку изоляцию «Монолит-2» изготавливают методом вакуум-нагнетательной пропитки, то за счет заполнения пор между проводниками стержней и пропитки витковой изоляции провода увеличивается жесткость стержней, а также получаются более высокие значения напряжения сдвига

изоляции по меди. На рис. 4.98 приведена зависимость предела прочности изоляции стержней при растяжении от температуры изоляции «Монолит-2».

Для определения этой характеристики изоляцию срезали со стержня и из нее изготовили плоские образцы размером 20×200 мм, толщина образцов составляла 2—3 мм. Предел прочности при растяжении изоляции «Монолит-2» превышает в 2,5—3,0 раза при температуре 20 °С и в 10—13 раз при рабочей температуре соответствующие значения предела прочности при растяжении микалентной компаундированной изоляции. На рис. 4.99 приведены значения сдвига изоляции «Монолит-2» в зависимости от площади при температуре 20 и 130 °С.

В связи с тем что в процессе эксплуатации могут иметь место удары стержней обмоток в месте выхода их из паза об активную сталь статора, в результате которых происходит снижение электрической прочности изоляции, были проведены работы по оценке изменения характеристик изоляции «Монолит-2» при ударно-циклических нагрузках. Сравнительные испытания нескольких типов изоляции проводились на отрезках натуральных стержней на копре типа ДСВО. После воздействий определялась кратковременная электрическая прочность изоляции. Влияние воздействий оценивалось по снижению пробивной напряженности изоляции. График этой зависимости, построенный в полулогарифмическом масштабе по экспериментальным точкам для 50 %-ной вероятности, показан на рис. 4.100.

Влияние нагрева на сопротивляемость изоляции ударно-циклическим воздействиям можно оценивать путем сравнения результатов испытаний при одинаковых уровнях воздействия, но разных температурах. Исследовалась зависимость пробивной напряженности от энергии удара. Зависимость $E_{пр(50\%)}(W_{уд})$ может быть представлена показательной функцией

$$E_{пр} = E_0 e^{-KW_{уд}},$$

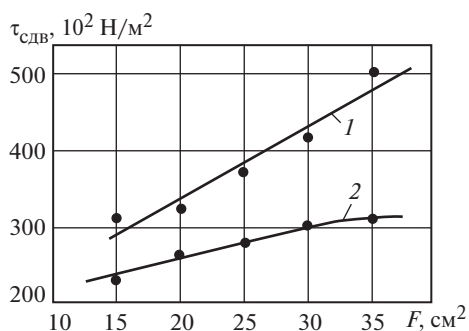


Рис. 4.99. Зависимость напряжения при сдвиге изоляции «Монолит-2» от площади:

1 — при температуре 20 °С; 2 — при температуре 130 °С

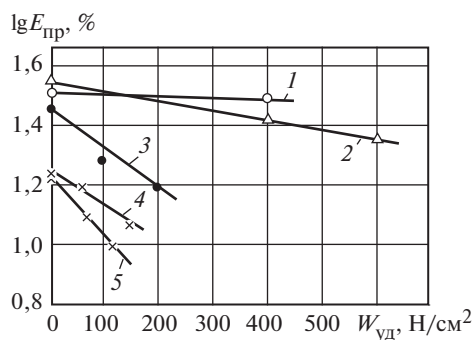


Рис. 4.100. Зависимость $\lg E_{пр(50\%)}$ от энергии удара:

1 — изоляция «Монолит-2»; 2 — «Слюдотерм»; 3 — изоляция ВЭС-2; 4 — микалентная компаундированная изоляция при температуре 20 °С; 5 — при температуре 70 °С

где E_0 — пробивное напряжение изоляции в исходном состоянии; e — основание натурального логарифма; $W_{уд}$ — удельная энергия удара; K — величина, характеризующая наклон зависимости, а следовательно, и сопротивляемость изоляции действию нагрузок.

Значение K для исследованных типов изоляции:

«Монолит-2»	0,003
«Слюдотерм».....	0,01
МКИ (18—25 °С)	0,024
ВЭС-2.....	0,047
МКИ (60—80 °С)	0,056

Наименьшее значение K у изоляции «Монолит-2» (0,003), наибольшее — у микалентной компаундированной изоляции, испытанной при температуре 60—80 °С (0,056). Таким образом, изоляция «Монолит-2» имеет наибольшую сопротивляемость ударно-циклическим нагрузкам.

Известно, что максимальным термомеханическим и электродинамическим воздействиям статорные обмотки подвергаются в режиме пуска электрической машины. Отличительные особенности конструкций статорной обмотки с изоляцией «Монолит-2» и шихтованного сердечника заключаются в превращении корзинок лобовых частей в прочную пространственную конструкцию и в подклейке пазовых частей обмотки к стенкам пазов шихтованного сердечника. Такие конструкции, обладая, казалось бы, несомненным преимуществом, могли оказаться неработоспособными. Из-за различных коэффициентов линейного расширения меди ($16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$), изоляции ($10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$), шихтованного сердечника ($12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$) и из-за перепада температур, особенно в период пусков, в них возникают механические напряжения, которые могут привести к усталостным разрушениям.

Как показали экспериментальные измерения с помощью тензодатчиков, относительные деформации лобовых частей обмоток АД серии АТД2 в период пусков не превышают $1,5 \cdot 10^{-4}$ отн. ед., а в установившихся режимах — $5 \cdot 10^{-4}$ отн. ед. Согласно расчетам и экспериментальным данным перегревы корпусной изоляции асинхронных двигателей серии АТД2 за пуск составляют 20—40 °С.

Для предварительного определения преимуществ обмотки с изоляцией «Монолит-2» по сравнению с МКИ был изготовлен опытный двигатель серии АТД1 мощностью 500 кВт, отличающийся от серийно изготавливаемых только изоляцией «Монолит-2» статорной обмотки с толщиной 3 мм на сторону. Тепловые испытания опытного и серийного АД показали, что изоляция «Монолит-2» обеспечивает значительное снижение перегревов обмотки статора, причем не только вследствие ее более высокой теплопроводности, но и благодаря тому, что при пропитке обмотки происходит подклейка катушек к стенкам пазов, склейка шихтованного сердечника и пропитываются вязки в лобовых частях. Испытания показали, что средний перегрев обмотки статора опытного АД относительно входящего воздуха в номинальном режиме ниже на 16,5 °С по сравне-

нию со статором с МКИ (46,5 и 63,0 °С соответственно). Обработка результатов показала, что АД с изоляцией «Монолит-2» способен обеспечить нагрузку 670 кВт, т.е. на 20 % больше, чем с МКИ (560 кВт).

На опытном АД было выполнено 1000 пусков от номинального напряжения с предельно допустимой по техническим условиям маховой массой. Затем было выполнено 50 режимных циклов для определения способности конструкции обмотки выдерживать технически максимально возможные колебания температуры. Охлажденный в среднем до -20 °С (минимальная температура -38 °С) АД запускался с маховой массой, на 30 % превышающей допустимую по ТУ, затем отключался от сети и подключался к источнику постоянного тока $1,2I_{\text{ном}}$, нагревался до средней температуры обмотки 150 °С. Режимы были подобраны так, что за время пуска примерно 11 с, перегрев обмотки составлял 45 °С, т.е. скорость нагрева составляла примерно 4 °С/с. В последующие 80—90 мин обмотка прогревалась до 150 °С; время охлаждения составляло 2,5 ч.

В процессе испытаний после 100, 300, 700 и 1000 пусков, а также после 50 пусков с отрицательной температурой АД разбирали для оценки состояния статора. Лобовые части катушек, радиальные и аксиальные каналы за время испытаний были покрыты слоем масла и грязью.

В табл. 4.27 приведены результаты электрических испытаний статорной обмотки, по которым можно сделать следующие выводы о состоянии статора:

- диэлектрические потери ($\text{tg } \delta$) и сопротивление обмотки остались на исходном уровне;
- не обнаружены изменения в качестве расклиновки обмотки в пазах и крепления в лобовых частях;
- изоляция при внешнем осмотре не растрескалась и не разбухла, о чем свидетельствуют также значения $\text{tg } \delta = f(U)$ и испытания при высоком напряжении;
- при появлении даже микротрещин они заполнились бы маслом, грязью или влагой, которой было в достаточном количестве в корпусе АД, когда он продувался наружным воздухом.

После всех испытаний статорная обмотка выдержала испытание напряжением 15 кВ в течение 1 мин (по ГОСТ 183 испытательное напряжение 13 кВ).

На основании положительных результатов испытаний был изготовлен опытный АД мощностью 800 кВт с изоляцией «Монолит-2» статорной обмотки, отличавшийся от серийно изготавливаемых следующим: толщина изоляции статорной обмотки составляла 2 мм на сторону вместо 3 мм для МКИ, нажимные элементы шихтованного сердечника статора (чугунная плита и нажимные пальцы) были заменены на два склеенных нажимных пакета из листов электротехнической стали основной позиции. Статорная обмотка и шихтованный сердечник статора испытывались в четыре этапа.

На первом этапе проводились режимно-циклические испытания при отрицательных температурах и проверялось влияние резких колебаний температур от -30 до 130 °С на электрические и механические свойства изоляции,

Таблица 4.27
Диэлектрические потери ($\operatorname{tg} \delta$, %) и сопротивление изоляции статорной обмотки опытного АД, выполненной с изоляцией «Монолит-2»

Параметр	Исходное состояние	После электромагнитных и тепловых испытаний	Состояние после пусков						
			Температура						
			1000 пусков	11 пусков	31 пуск	50 пусков			
Испытательное напряжение, кВ: 1 2 3 4 5 6 7	20	20	20	20	40	140	—	20	140
	—	0,6	0,4	0,1	0,7	1,2	0,5	—	—
	—	0,6	0,4	0,1	0,5	1,3	0,3	—	—
	0,7	0,6	0,6	0,1	0,4	1,4	0,4	—	1,6
	—	0,9	1,0	0,3	0,6	1,7	0,5	—	2,1
	1,5	2,7	2,1	2,1	0,9	3,6	1,8	2,3	4,1
	—	4,5	4,4	3,6	3,0	6,4	3,4	4,8	5,8
Сопротивление $R_{\text{обм}}$, МОм, более	4,9	—	5,8	4,9	3,1	7,8	3,6	5,6	7,4
	10 000	10 000	5000	5000	5000	3000	5000	5000	3000

Примечание. На значения $\operatorname{tg} \delta$ и R обмотки повлияло наличие масла и грязи, которыми покрывался статор при испытаниях.

на конструкцию обмотки и шихтованный сердечник. Для создания таких условий был отработан рабочий цикл:

- пуск из охлажденного состояния до температуры наружного воздуха, от номинального напряжения с маховой массой на 5 % больше максимально допустимой по ТУ;
- свободный выбег с одновременным нагревом обмотки статора постоянным током, равным $1,7I_{\text{ном}}$ (150 А), до 130 °С;
- охлаждение до температуры наружного воздуха.

Всего было проведено 160 режимных циклов. Минимальная отрицательная температура составляла –30 °С, средняя –8,9 °С. После 50, 100 и 160 циклов происходило испытание обмотки напряжением $1,5U_{\text{ном}}$ (9 кВ) в течение 3—5 мин, когда производились балансировка моста и измерения $\text{tg} \delta$ изоляции. Результаты испытаний приведены на рис. 4.101.

На втором этапе проводились электродинамические и термомеханические испытания в пусковых режимах. Рабочий цикл имел вид: пуск от номинального напряжения с маховой массой на 20 % больше предельно допустимой по ТУ, охлаждение, торможение. Для увеличения температуры обмотки статора 83 % аксиальных каналов было заглушено для охлаждения. Всего была проведена 1000 таких пусков. После 270, 500 и 1000 пусков проводились измерения $\text{tg} \delta = f(U_{\text{исп}})$ обмотки (см. рис. 4.101) и ее сопротивление.

После проведения 270 и 1000 пусков на втором этапе двигатель разбирался для оценки состояния статора. Никаких нарушений в креплении обмотки в пазу и лобовых частях не было. Длина сердечника статора по зубцам не изменилась;

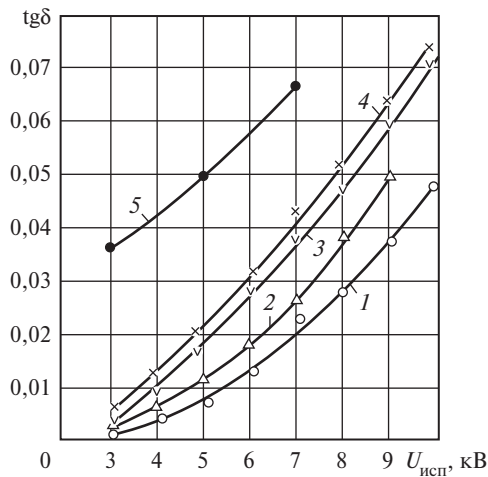


Рис. 4.101. Тангенс диэлектрических потерь статорной обмотки с изоляцией «Монолит-2» электродвигателей мощностью 800 кВт:

1 — изоляция в исходном состоянии; 2 — после 160 пусков с отрицательной температурой; 3 — после 1000 пусков; 4 — после испытаний в камере тропического климата; 5 — после испытаний в камере тропического климата при температуре 160 °С

клеенные пакеты находились в хорошем состоянии. Вся обмотка и каналы железа были покрыты маслом и грязью. Не отмечено никакого разбухания или растрескивания изоляции, но наличие масла и грязи сказалось отрицательно на зависимости $\operatorname{tg} \delta = f(U_{\text{исп}})$ (см. рис. 4.101).

На третьем этапе проводились испытания статора в камере тропического климата: выдержка в течение 8 ч при температуре $40 \pm 20^\circ \text{C}$ и влажности 94—100 %, охлаждение в течение 8 ч до $35 \pm 2^\circ \text{C}$ и т.д. Испытания продолжались 56 сут. Сопротивление изоляции в период испытаний колебалось от сотен до 5 МОм и в последние сутки при температуре 42°C было 100 МОм, при температуре 33°C — 500 МОм. Через несколько суток (что было связано с перевозкой статора) после окончания испытаний в камере тропического климата без предварительной сушки была снята зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ обмотки. Результаты испытаний приведены в табл. 4.28.

На четвертом этапе после всего комплекса испытаний определялся запас электрической прочности витковой и корпусной изоляции. Для испытаний витковой изоляции у катушек в лобовых частях разделялась корпусная изоляция, разрезались и разводились проводники. На один виток подавалось напряжение (50 Гц), а другой заземлялся. Несмотря на осторожность при разделке витков, все пробойи произошли именно в местах разделки. Корпусная изоляция испытывалась в масле. На рис. 4.102 и 4.103 приведены результаты испытаний витковой и корпусной МКИ (толщиной 3 мм) катушек после укладки в статор.

Результаты электрических испытаний статорной обмотки и состояние статора позволили сделать выводы:

- после всего комплекса испытаний изоляция «Монолит-2» находится в удовлетворительном состоянии, электрическая прочность витковой изоляции выше, а корпусной — на уровне электрической прочности новой МКИ статорных обмоток, направленных заказчику, и не менее пятикратного по отношению к номинальному рабочему напряжению;
- никаких видимых изменений не произошло как в конструкции корзины лобовых частей, так и в шихтованном сердечнике.

Таблица 4.28

Значения $\operatorname{tg} \delta$ и сопротивления изоляции после испытаний

Параметр	$\operatorname{tg} \delta$ после испытаний в камере тропического климата, %, при температуре	
	20 °C	140 °C
Напряжение, кВ:		
3	0,7	3,6
5	2,0	4,8
7	4,2	6,6
10	7,3	11,3
Сопротивление R , МОм	10 000	3000

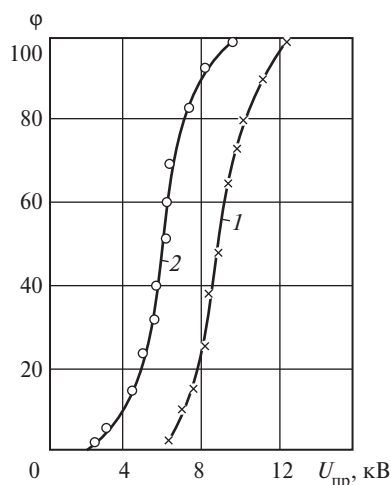


Рис. 4.102. Распределение значений пробивных напряжений витковой изоляции:

1 — «Монолит-2» после всех испытаний;
2 — МКИ в исходном состоянии

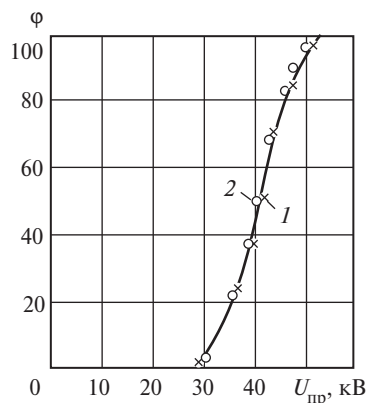


Рис. 4.103. Распределение значений пробивных напряжений корпусной изоляции катушек:

1 — «Монолит-2» (толщиной 2 мм) после всех испытаний;
2 — МКИ (толщиной 3 мм) в исходном состоянии после укладки в статор

Всестороннему обследованию после эксплуатации был подвергнут двигатель (заводской № 1) мощностью 5 МВт, у которого наибольшая длина пазовой части равна 1000 мм (из-за ограниченных мощностей испытательной станции невозможно выполнить прямой пуск такого двигателя). Двигатель эксплуатировался у заказчика в нормальных общепромышленных условиях на Ворошиловградской ГРЭС, и его наработка составила 20 тыс. ч, за этот период было выполнено 500 прямых пусков. Был проведен всесторонний анализ состояния отдельных узлов, в том числе сердечника статора и его обмотки. Состояние клеевых нажимных пакетов, лобовых частей катушек хорошее. Не обнаружено ни растрескивания изоляции, ни ослабления вязок в лобовых частях. Измеренные токи утечки в фазах, сопротивление и $\text{tg } \delta$ обмотки показывают ее хорошее работоспособное состояние (табл. 4.29 и на рис. 4.104).

Фазы выдержали испытательное напряжение 18 кВ в течение 1 мин.

Таблица 4.9

Токи утечки обмоток

Фаза	Ток утечки, мкА, при напряжениях				Сопротивление обмоток, МОм, более
	15 с		60 с		
	18 кВ	24 кВ	18 кВ	24 кВ	
<i>A</i>	0	0	0	0	1000
<i>B</i>	0	2	0	2	1000
<i>C</i>	0	2	0	0	1000

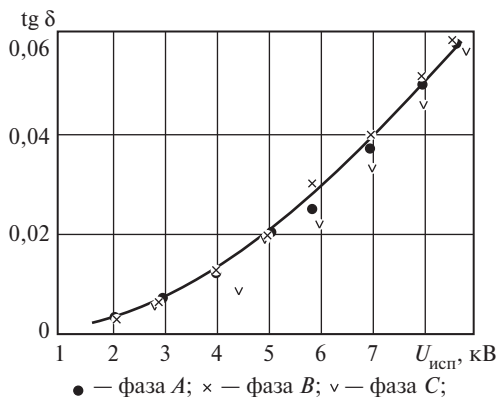


Рис. 4.104. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от напряжения статорной обмотки с изоляцией «Монолит-2» электродвигателя 2АЗМ-5000/6000 ($P = 5000$ кВт, $U_n = 6$ кВ, заводской № 1, наработка в эксплуатации — 2 тыс. ч)

Для проведения испытаний при высоком напряжении статорную обмотку (со стороны выводов) опускали в масло. Несмотря на принятые меры, из-за загрязненности поверхности изоляции в лобовых частях ни одну фазу пробить не удалось. Напряжения перекрытий составили: для изоляции фазы А более 46 кВ, фазы В более 48 кВ, фазы С более 42 кВ (толщина изоляции на сторону приблизительно 2,2 мм). Для выявления микротрещин в изоляции сердечник с обмоткой подвергался в течение нескольких месяцев атмосферным воздействиям вне помещения. В период осадков (дождей) сопротивление обмотки снижалось до нескольких мегаом, но без принудительной сушки восстанавливалось до исходного — 10 ГОм за несколько часов, что указывало на поверхностное увлажнение и отсутствие в изоляции микротрещин. Пробивное напряжение витковой изоляции составило примерно 9 кВ.

Состояние внешних слоев изоляции пазовых частей катушек (фазных), извлеченных из пазов, показало, что пазовые разряды в период эксплуатации отсутствовали и что сохранилась прочная подклейка изоляции к стенкам пазов: на внешнем слое изоляции сохранился слой компаунда с рельефом расшивки железа сердечника. При послойной размотке изоляции не обнаружено следов ионизационного разрушения изоляции и термоокислительной деструкции компаунда.

Для определения надежности изоляции и конструкций статорных обмоток двигателей серии ВАО мощностью 400 кВт, работающих на насосах водоотлива в угольных шахтах при температуре окружающей среды до 35 °С, относительной влажности 98—100 % и пускаемых в сутки до 20 раз, были определены пробивные напряжения изоляции катушек четырех двигателей после 3200, 5800, 9300 и 10 000 ч эксплуатации на насосах главного водоотлива шахты им. Кирова «Кузбассуголь». Результаты испытаний показали, что пробивное напряжение изоляции катушек этих двигателей находилось в пределах 30—62 кВ, при этом не было обнаружено его снижения с увеличением времени эксплуатации,

по крайней мере, после эксплуатации до 10 тыс. ч включительно (для каждой наработки испытано по 60 катушек). Состояние корзинок обмотки, вязки лобовых частей, качества заклиновки пазовых частей катушек в пазах оценивается как хорошее. Отсутствуют следы пазовых разрядов на поверхности катушек. На внешнем слое изоляции сохранился слой компаунда с рельефом расшихтовки железа сердечника. Не обнаружено следов ионизационного разрушения изоляции и термоокислительной деструкции компаунда. Результаты проведенных исследований предварительно подтвердили способность конструкции шихтованного сердечника (без традиционных нажимных торцевых элементов и склейки листов электротехнической стали) и обмотки с изоляцией «Монолит-2» (с креплением ее в пазовых и лобных частях за счет подклейки эпоксидным компаундом) выдерживать предельные термо- и электродинамические воздействия, возникающие в период пусков АД, на устойчивость ее к отрицательным температурам, влаге, маслу и другим загрязнениям.

При исследованиях на стержнях-макетах не представляется возможным воспроизвести термомеханические воздействия, возникающие в период пусков АД, и они частично имитировались вибрационными испытаниями.

Для более объективной оценки работоспособности статора он подвергался ускоренным воздействиям основных эксплуатационных факторов, исходя из предположения, что его срок службы составляет 100 тыс. ч. Весь объем воздействий разбит равномерно на 10 циклов, каждый из которых включал в себя следующие последовательные воздействия.

1. Ускоренное тепловое старение при $t_{\text{раб}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$) в течение 312 ч.
2. Ускоренное электрическое старение обмотки при $U_{\text{ф}} = 3,8\text{ кВ}$, т.е. при $1,9\text{ кВ/мм}$ частотой 2400 Гц в течение 208 ч; номинальное рабочее напряжение обмотки — 6 кВ, но с учетом колебаний напряжения в сети в соответствии с ГОСТ 183 принято $U_{\text{ф}} = 3,8\text{ кВ}$.
3. Воспроизведение 300 пусков примерно с пятикратным пусковым током по отношению к номинальному току с длительностью пуска 15 с. При пусках скорость нагрева составляла примерно $4\text{ }^{\circ}\text{C/с}$, а перегрев — $55\text{—}60\text{ }^{\circ}\text{C}$. По предварительным данным потребителей, АД серии АТД2 подвергаются примерно 3 тыс. пусков за срок эксплуатации. Для воспроизведения пусков катушки обмотки соединялись в трехфазную звезду по пять катушек последовательно в каждой фазе (для воспроизведения пусков на всех 60 катушках обмотки трехфазная звезда собиралась 4 раза; фазы размещались по окружности статора под 120° по отношению одна к другой). При изготовлении обмотки межкатушечные соединения не выполнялись, а после пропитки и запекания статора к концам катушек припаивались гибкие соединения. Последнее позволяло соединять катушки в фазы и подключать к сети переменного тока (50 Гц) напряжением 380 В.
4. Воздействие воды в течение 2 сут, когда сердечник полностью погружался в емкость и над водой находились только 150 мм обмотки с выводами от катушек.
5. Воздействие профилактического испытательного напряжения, равного $2U_{\text{ном}} = 12\text{ кВ}$ частотой 50 Гц в течение 1 мин.

Воздействия по пп. 4 и 5 должны были облегчить выявление повреждений (микротрещин, расслоений и т.д.), появляющихся в процессе испытаний.

Статорная обмотка была выполнена из 30 катушек с изоляцией из стеклослюдинитовых лент ЛСКН-160ТТ и ЛСКН-160ТБл, в которой одна стеклоподложка заменена на лавсановую бумагу толщиной 40 мкм. Толщина изоляции составляла 2 мм на сторону.

В последнее время из-за дефицита стеклоподложек наметилась тенденция к замене одной из них на заменители: лавсановую и микалентную бумагу; лавсановую пленку; лавсановые бумаги, армированные для механической прочности продольными стеклонитями.

Исследования работоспособности обмотки с изоляцией на основе ленты ЛСКН-160ТБл обуславливаются тем, что лавсан относится к материалу класса нагревостойкости ниже, чем В, которому отвечает изоляция «Монолит-2» на основе ленты ЛСКН-160ТТ. С другой стороны, после пропитки эпоксидным компаундом лавсановая бумага, очевидно, может отвечать этому классу нагревостойкости. Технологическое опробование ленты ЛСКН-160ТБл при изолировке катушек вручную и на станках показало, что возможна замена ленты ЛСКН-160ТТ, так как напряжение $E_{пр}$ ленты в процессе изолировочных работ снижается в тех же пределах, что и у ленты ЛСКН-160ТТ. Изоляция выполняется без морщин и складок. После пропитки и запекания катушки, отдельно изготовленные, имели $\text{tg}\delta \leq 0,03$ при $E_{исп} = 4,5$ кВ/мм; срок жизни катушек при $E_{исп} = 10$ кВ/мм составил: τ_{min} — 100 ч, $\tau_{50\%}$ — 400 ч и τ_{max} — 850 ч. Таким образом, по технологичности, значению $E_{пр}$ и сроку жизни изоляция на основе ленты ЛСКН-160ТБл не уступала изоляции на основе ЛСКН-160ТТ.

После воздействия 10 циклов (равнозначных 100 тыс. ч эксплуатации) ни одна катушка статора не пробилась, а их сопротивления остались практически на исходном уровне. Не установлено ухудшений монолитности склейки шихтованного сердечника, крепления обмотки, корзинок лобовых частей. Дополнительно обмотка была подвергнута ускоренному электрическому старению при $U_{ном} = 6,6$ кВ (3,3 кВ/мм), $f = 2400$ Гц в течение 5 тыс. ч, что для частоты 50 Гц равнозначно 250 тыс. ч. Ни одна катушка в период и этих испытаний не пробилась, и они выдержали испытания напряжением 18 кВ, частотой 50 Гц, которое прикладывалось в течение 1 мин. В период эксплуатации у заказчика после ремонта двигателей статорные обмотки испытывают напряжением 12 кВ в течение 1 мин. После окончания всех испытаний у каждой катушки была определена кратковременная электрическая прочность (рис. 4.105); были обрезаны лобовые части, выбиты пазовые клинья и выпрессованы из пазов шихтованного сердечника пазовые части всех катушек с фиксацией усилий выпрессовки.

На внешнем слое изоляции пазовых частей только частично сохранился компаунд с рельефом расшихтовки железа, не обнаружено следов пазовых разрядов. На большей части поверхности и примерно на глубину одного слоя изоляции (состоявшей из семи слоев) произошла деструкция компаунда от совместного воздействия воды и повышенной температуры. После удаления верхнего, повреж-

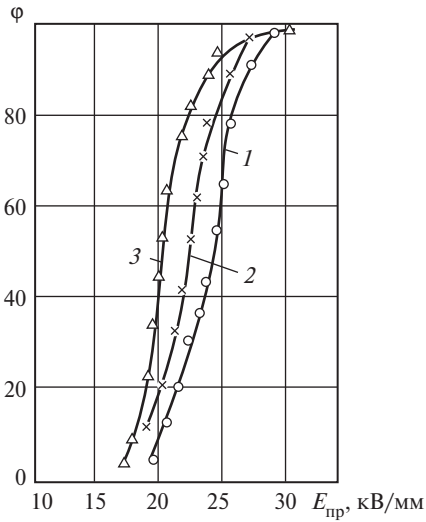


Рис. 4.105. Распределение значений $E_{пр}$ изоляции статорной обмотки (ленты ЛСКН-160ТТ — кривые 1, 2 и ЛСКН-160ТБл — кривая 3):

1 — исходное состояние; 2, 3 — после циклических испытаний (10 циклов) и длительного электрического старения при $U = 6,6$ кВ, $f = 2400$ Гц в течение 5 тыс. ч

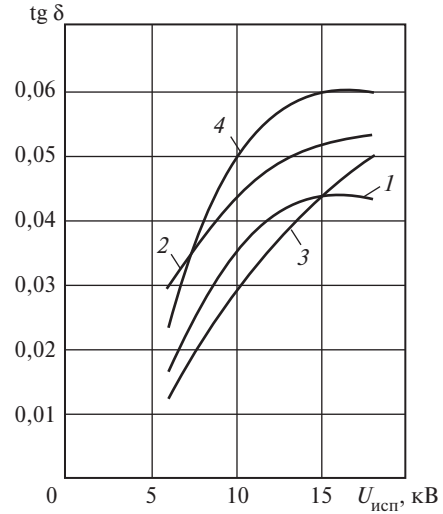


Рис. 4.106. Распределение значений $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ изоляции статорной обмотки (ленты ЛСКН-160ТТ — кривые 1, 2 и ЛСКН-160ТБл — кривые 3, 4):

1, 3 — исходное состояние; 2 и 4 — после циклических испытаний (10 циклов) и длительного электрического старения при $U = 6,6$ кВ, $f = 2400$ Гц в течение 5 тыс. ч

денного, слоя на непробитых участках пазовых частей катушек была снята зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ (рис. 4.106) и определены усилия среза изоляции по слоям (рис. 4.107).

Полученные данные свидетельствуют о надежной длительной работоспособности конструкции шихтованного сердечника и статорной обмотки с изоляцией «Монолит-2», выполненной на основе стеклослюдинитовых лент марок ЛСКН-160ТТ и ЛСКН-160ТБл.

При таких же циклических испытаниях статорных обмоток на основе лент, в которых одна из стеклоподложек была заменена на микалентную бумагу, или на лавсановую пленку, через три-семь циклов происходили пробой катушек в период ускоренного электрического старения, или в период профилактического старения, или при профилактических испытаниях при напряжении 12 кВ в течение 1 мин.

Эти данные свидетельствуют об эффективности предложенной программы ускоренных испытаний статорных обмоток.

Изучение закономерности разрушения изоляции «Монолит-2» на стержнях-макетах под воздействием электрического поля показало, что ее кривая жизни может быть описана в координатах $[\lg(E, \text{кВ/мм}); \lg(\tau, \text{ч})]$ отрезком прямой линии, уравнение которой имеет вид

$$\lg \tau = \lg A - B \lg E = 8,5 - 6,2 \lg E,$$

где A, B, E — эмпирические коэффициенты.

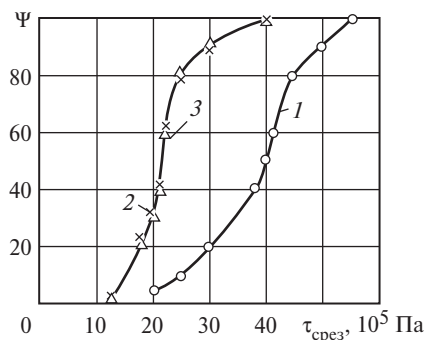


Рис. 4.107. Распределение значений $\tau_{\text{среза}}$ изоляции статорной обмотки (ленты ЛСКН-160ТТ — кривые 1, 2 и ЛСКН-160ТБл — кривая 3):

1 — исходное состояние; 2, 3 — после циклических испытаний (10 циклов) и длительного электрического старения при $U = 6,6$ кВ, $f = 2400$ Гц в течение 5 тыс. ч

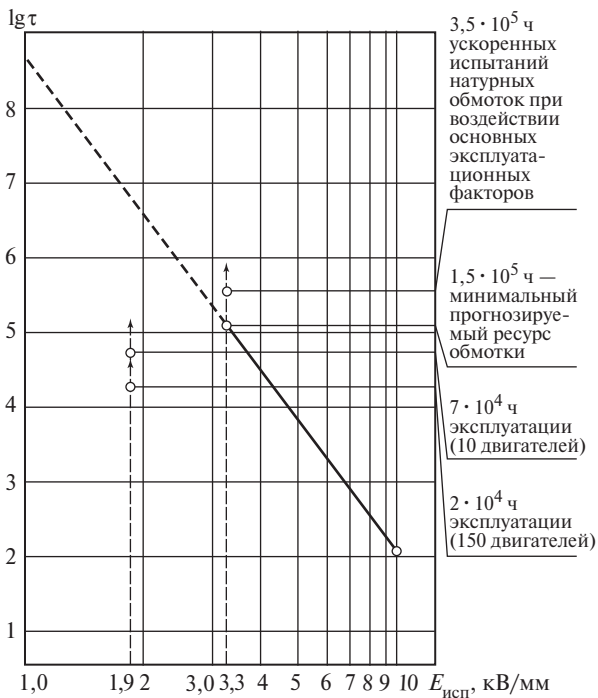


Рис. 4.108. Ориентировочная кривая жизни статора с изоляцией «Монолит-2»:

○ — натурные катушки; → — отсутствие пробоев при испытаниях и в эксплуатации

По результатам исследований построена ориентировочная кривая жизни изоляции «Монолит-2» статора (рис. 4.108). Из рисунка видно, что ресурс изоляции составляет не менее 150 тыс. ч в условиях эксплуатации двигателей серии АТД2, а это при средней ежегодной наработке, например, 5 тыс. ч составит не менее 30 лет, в течение которых изоляции статора не потребуется проведения капитального ремонта.

Обмотки, изготовленные по технологии «Монолит-2», обладают высокой однородностью свойств изоляции в пазовой и лобовых частях и в межкатушечных соединениях, так как пропитка изоляции эпоксидным компаундом производится после выполнения всех изоляционных работ. Изоляция этих двигателей допускает испытания высоким напряжением при полном погружении в воду. Для определения надежности изоляции двигателей на номинальное напряжение 6 кВ, работающих на насосах водоотлива в угольных шахтах при температуре окружающей среды 35 °С и относительной влажности 98—100 %, пускаемых в сутки до 20 раз, были определены пробивные напряжения катушек после 3200, 5800, 9350 и 10 250 ч эксплуатации. Пробивные напряжения катушек этих двигателей находились в пределах 35—50 кВ, при этом не было обнаружено существенного снижения пробивного напряжения с увеличением времени эксплуатации.

На уложенных и закрепленных в пазах натуральных секциях электродвигателя СТД-4000 были проведены работы по определению влияния на изоляцию «Монолит-2» термомеханических усилий, возникающих в синхронных машинах в условиях прямого пуска. На специальной установке секции разогревались электрическим током со скоростью нарастания температуры на медных проводниках 7 и 10 °С/с. Как показали испытания, термомеханические деформации изоляции обмоток статора при указанных режимах не вызывают заметных изменений электрических свойств изоляции «Монолит-2».

Для изоляции двигателей на напряжение свыше 6 кВ были разработаны полупроводящие покрытия на основе медьсеребросодержащих лент. Проведенные исследования характеристик противокоронной защиты на основе этих лент в процессе воздействия электрического поля ($U = 35, 30, 25, 15$ кВ при $f = 50$ Гц и $U = 10$ кВ при $f = 100$ Гц), повышенной температуры (130 и 160 °С), масляной и водных сред, коронных разрядов, термомеханических нагрузок показали высокую надежность разработанной конструкции.

Эксплуатационная надежность обмотки двигателей с изоляцией «Монолит-2» также подтверждается анализом эксплуатации синхронных тяговых двигателей (СТД). Сбор статистических данных с мест эксплуатации произведен в соответствии с основными положениями посредством разработанных информационных карт. Обработка эксплуатационной информации производилась путем построения статистического ряда случайных величин (продолжительности работы t).

Для этого область определения случайной величины $x_i(x_{\max} - x_{\min})$ разбивалась на L равных интервалов, частота попадания q_i переменной x_i в каждый интервал вычислялась по формуле

$$q_i = \frac{n_i}{N},$$

где n_i — число значений x_i попавших в i -й интервал; N — общее число обследуемых электродвигателей.

Сумма частот отказов всех групп равна единице.

Графически статистические ряды представлены в виде гистограмм.

Для расчета количественных показателей надежности их номенклатура выбрана в соответствии с методиками расчета надежности электрических машин, ремонтируемых электрических машин на основании следующих условий:

- поток отказов простейший;
- отсутствие последствия;
- интенсивность отказов в период нормальной эксплуатации не зависит от

времени, т.е. $\hat{\lambda}(t_i) = \text{const}$;

- отказы являются событиями случайными и независимыми.

При расчете количественных показателей надежности определены:

- интенсивность отказов

$$\hat{\lambda}(t_i) = \frac{r_i(\Delta t)}{N\Delta t};$$

- вероятность безотказной работы в течение наработок $\tau = 10$ тыс., 25 тыс. ч

$$P_{(\tau)} = e^{-\hat{\lambda}(t_i)\tau};$$

где r_i — количество отказов в интервале времени Δt ; N — количество обследованных электродвигателей; Δt — интервал времени, в котором произошли отказы.

Точность полученных результатов оценивалась с помощью доверительных границ с доверительной вероятностью 80 % по формулам:

$$\lambda_B = r_1 \hat{\lambda}, \quad P_B = e^{-\lambda_B \tau};$$

$$\lambda_H = r_1 \hat{\lambda}, \quad P_H = e^{-\lambda_H \tau};$$

где $\lambda_B, P_B, \lambda_H, P_H$ — верхняя и нижняя доверительные границы; $\hat{\lambda}$ — расчетное значение показателя надежности; r_1, r_2 — табличные коэффициенты, зависящие от количества отказов и доверительной вероятности.

По статистическим данным с мест эксплуатации получена информация о работе 844 синхронных электродвигателей серии СТД мощностью 1250—10 000 кВт.

Электродвигатели серии СТД эксплуатируются на предприятиях нефтяной, газовой, химической и металлургической промышленности. Статистические данные общей продолжительности работы представлены графически в виде гистограммы на рис. 4.109.

Продолжительность работы электродвигателей составила от 1 тыс. до 45 тыс. ч.

Гарантийную наработку (10 тыс. ч) отработали 66,3 % двигателей.

При анализе статистической информации выявлено, что эксплуатация электродвигателей на ряде предприятий проводится в основном в соответствии с правилами эксплуатации, за исключением нефтеперекачивающих станций и кустовых насосных станций на нефтяных месторождениях, где нет систематического контроля за работой и техническим обслуживанием двигателей. Также на большинстве предприятий не ведется регулярной записи в журналах обо всех осмотрах, остановках двигателей на ремонт или техническое обслуживание, в связи с чем не представляется возможным рассчитать коэффициент технического использования двигателей.

Из общего объема 844 наблюдения составили выборку из двигателей серии СТД, имеющих 38 отказов изоляции обмоток статора. Распределение отказов по характеру и мощности двигателей представлено в табл. 4.30.

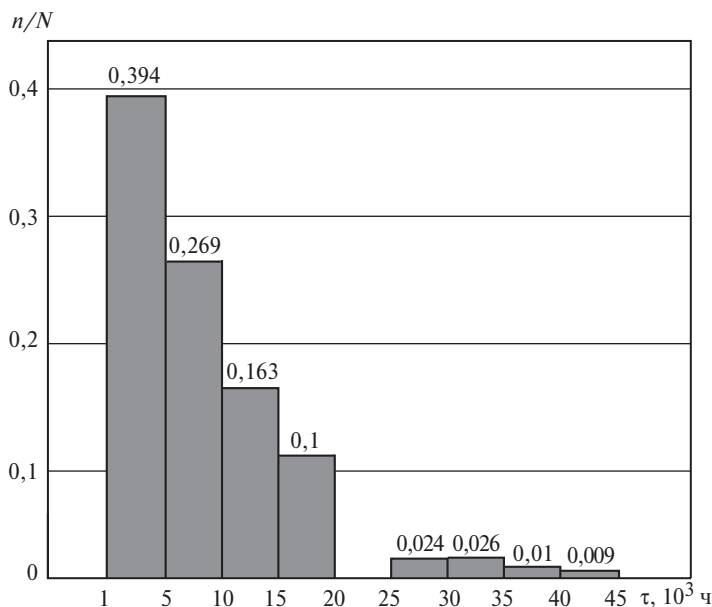


Рис. 4.109. Гистограмма распределения общей продолжительности работы электродвигателей серии СТД

Пробой обмотки статора на корпус в общем числе отказов составляет 55,3 %, наработка электродвигателей до отказа — от 48 ч до 28 тыс. ч. Один отказ произошел в период пуска наладочных работ. Причиной отказа в этом случае является дефект изготовления, так как данное время наработки недостаточно для старения изоляции.

Вследствие витковых замыканий 21 % отказов произошел в обмотке статора с наработкой до отказа 701—7700 ч.

Отказы витковой изоляции указывают на несовершенство технологии и контроля качества. Для повышения надежности витковой изоляции была изменена конструкция изоляции, введены дополнительные технологические приемы и повышены нормы испытаний катушек при изготовлении.

Механические повреждения изоляции происходят в результате загрязнения лобовых частей графитовой пылью щеточного аппарата и маслом от подшипников скольжения. Это следствие отсутствия регулярной чистки узла щеточный аппарат — контактные кольца и постоянного контроля за давлением и расходом масла в подшипниках и уплотнениями их.

Для расчета показателей надежности составлена выборка из электродвигателей серии СТД с 28 происшедшими отказами. Отказы, не характеризующие надежность конструкции изоляции и происшедшие в период пуска наладочных работ, при оценке надежности не учитывались (см. табл. 4.30).

На рис. 4.110 показана динамика отказов в процессе эксплуатации двигателей.

Таблица 4.30

Распределение отказов

Вид повреждения	Тип двигателя							Итого
	СТД-1250-2	СТД-1600-2	СТД-3150-2	СТД-4000-2	СТД-6300-2	СТД-8000-2	СТД-10000-2	
Пробой на корпус	$\frac{9}{9}$	$\frac{4}{4}$	—	$\frac{6}{5}$	$\frac{2}{2}$	—	—	$\frac{21}{20}$
Витковое замыкание	$\frac{2}{2}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2}{2}$	—	$\frac{8}{8}$
Механическое повреждение изоляции	—	—	—	—	$\frac{4}{0}$	—	$\frac{2}{0}$	$\frac{6}{0}$
Перенапряжение в сети в результате грозового удара	$\frac{1}{1}$	—	—	$\frac{1}{0}$	—	—	—	$\frac{1}{0}$
Пробой в результате загрязнения лобовых частей	—	—	—	—	—	—	$\frac{1}{0}$	$\frac{1}{0}$
Итого ...	$\frac{12}{11}$	$\frac{5}{5}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{8}{6}$	$\frac{7}{3}$	$\frac{2}{2}$	$\frac{3}{0}$	$\frac{38}{28}$

Примечание. Числитель — общее число отказов; знаменатель — отказы, учтенные при расчете показателей надежности.

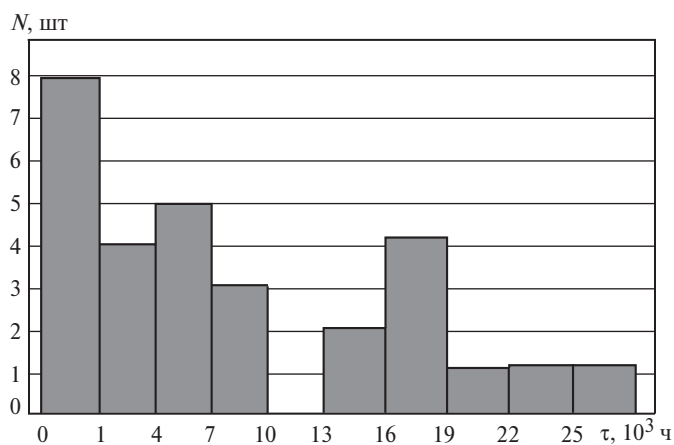


Рис. 4.110. Динамика выхода из строя электродвигателей в процессе эксплуатации

Значения показателей надежности рассчитаны для интервала времени, в котором произошли отказы, $\Delta t = 28$ тыс. ч.

При $r_i = 28$ отказам и доверительной вероятности $\alpha = 80\%$ $r_1 = 1,18$; $r_2 = 0,84$.

Для термореактивной изоляции «Монолит-2» обмоток статора электродвигателей серии СТД получены следующие показатели надежности:

- интенсивность отказов — $1,18 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
- вероятность безотказной работы в течение срока гарантии (10 тыс. ч.) — 0,989.

4.3. Изоляция «Монолит-3»

Изготовление изоляции «Монолит-2» для двигателей с шаблонной обмоткой методом полной вакуум-нагнетательной пропитки статора эпоксидным компаундом нашло широкое применение на электромашиностроительных заводах. Массовые серии двигателей типа АТД, ВАО, ОПЧ, А-4, ДАЗО, СТД и др., выпускавшихся в больших количествах, имели в основном диаметр сердечника или корпуса (если пропитка проводилась в корпусе) 2,5—3,0 м. Соответственно вакуум-пропиточное оборудование изготовлялось под эти массовые серии.

Однако на электромашиностроительных заводах выпускались и двигатели 22-го и 24-го габаритов. В основном это тихоходные мельничные двигатели серии ДАЗО, размеры которых значительно превышали 3 м. Для полной пропитки статоров таких двигателей требовался котел большого диаметра с использованием одновременно несколько десятков тонн эпоксидного компаунда. А так как эти серии выпускались небольшими партиями, обновление компаунда было небольшим и соответственно он быстро набирал вязкость. Поэтому пропитка статоров в сборе была экономически нецелесообразна.

Для обеспечения этих двигателей термореактивной изоляцией были разработаны технологические решения по вакуум-нагнетательной пропитке эпоксидным компаундом отдельных катушек с последующей укладкой их в статор и термообработкой в термостате или пропусканьем тока по обмоткам. Этот технологический способ изготовления термореактивной изоляции получил название «Монолит-3».

Технологический процесс состоит из следующих операций. Катушки, изолированные сухими стеклослюдинитовыми лентами, подготовленные для укладки в статор, укладывают в приспособление для пропитки и пропитывают вакуум-нагнетательным способом эпоксидным компаундом ПК-11 по режимам пропитки изоляции «Монолит-2». После пропитки катушки извлекают из пропиточного котла и выдерживают на воздухе в цеховых условиях не менее суток. За это время поверхность изоляции катушек подсыхает, исчезает липкость эпоксидного компаунда, что позволяет проводить укладочные работы.

Для обеспечения укладки катушек в статор их предварительно подогревают путем пропускания постоянного тока по обмотке катушки.

Полностью обмотанный статор помещают в термостат и термообработывают при температуре 155 ± 5 °С в течение 24 ч после повышения температуры.

Опыт применения такой технологии показал, что технология обеспечивает хорошее изготовление обмоток двигателей с короткими пазовыми частями.

При использовании катушек с пазовыми частями длиной 500 мм и выше возникали серьезные трудности при укладке обмоток вследствие их пухлости. Поэтому для обеспечения заданного размера катушек в пазовой части после изолировки сухими стеклослюдинитовыми лентами на пазовые части наносился препрег (пропитанная стеклоткань) с зазором 2—3 мм и катушки до пропитки подпрессовывались до необходимой толщины при температуре 150 °С. Такой технологический прием обеспечивал сохранение требуемого размера пазовой части катушек после пропитки и хранения, что решало проблемы укладки катушек в статор.

Применение этой технологии для различных типов электрических машин, показало, что при использовании ее для многовитковых катушек, витковая изоляция в головках катушек, особенно у шаговых катушек (наиболее подверженных деформации), повреждается, что ведет к последующему пробое. Тогда для такого типа обмоток была разработана следующая технология.

1. На пазовую часть и половину лобовой части катушки, подготовленной к изолировке, наносят корпусную изоляцию из сухих стеклослюдинитовых лент.

2. На лобовых частях изоляцию выполняют в виде конуса. Головки катушек и половину лобовых частей оставляют открытыми. Поверх слюдинитовой ленты наносят фторопластовую пленку.

3. Катушки укладывают в приспособление, в котором пресс-планками фиксируется пазовая часть. Далее открытые неизолированные лобовые части и головки катушек пропитывают методом окунания в эластичное связующее на основе модифицированных сополимеров бутилметакрилата АС-20 в течение 15—20 мин. Пропитку ведут поочередно: вначале пропитывают одну сторону, дают возможность стечь излишкам компаунда, затем приспособление переворачивают и пропитывают другую сторону. После этого приспособление помещают в печь и с одновременной сушкой изоляции полимеризуют эластичное связующее.

4. Высушенные катушки с полимеризованным эластичным связующим в лобовых частях помещают в пропиточный котел и пропитывают под вакуумом и давлением эпоксидным компаундом. Затем катушки извлекают из котла и термообработывают в термостате. По окончании термообработки катушку освобождают от пресс-планок и фторопластовой пленки и на лобовые части наносят эластичные ленты на основе кремнийорганической резины ЛЭТСАР или РЭТСАР.

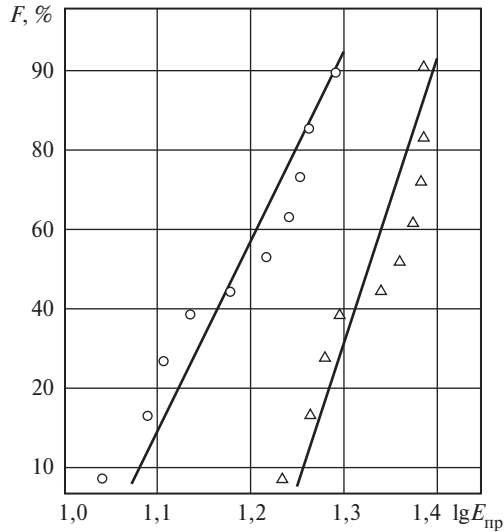


Рис. 4.111. Кратковременная электрическая прочность изоляции головок лобовых частей катушек: Δ — до деформации; $\circ$ — после деформации

5. Подготовленные таким образом катушки укладывают в статор.

Данная технология позволила получить термореактивную изоляцию, в которой была устранена возможность повреждения витковой изоляции в лобовых частях за счет эластичного компаунда и сохранялась ремонтпригодность изоляции катушек. В дальнейшем эта технология была модернизирована при изготовлении стеклослюдинитовых лент ЛСГ на эластичном связующем АС-20. В этом случае сразу после пропитки окунанием в компаунд АС-20 лобовые части и головки изолировали лентой ЛСГ до заданной толщины, а далее — по вышеуказанной технологии.

Для определения влияния деформаций, возникающих после укладки в статор (имитация укладки шаговых катушек в статор), дополнительно была определена кратковременная электрическая прочность изоляции головок лобовых частей катушек из ленты ЛСГ. Перед перегибом лобовые части катушек разогревали до температуры 90—100 °С и изгибали на 110—120°. Из рис. 4.111 видно, что корпусная изоляция макетов лобовой части из ленты ЛСГ выдерживает значительную деформацию без существенного повреждения изоляции. При 50 %-ной вероятности пробоя пробивное напряжение корпусной изоляции составляет 21 кВ до деформации и 16 кВ после деформации.

Комплексные испытания изоляции «Монолит-3» показали, что по всем электрофизическим и механическим характеристикам она аналогична изоляции «Монолит-2».

4.4. Изоляция «Монолит-4»

4.4.1. Технология изготовления изоляции «Монолит-4»

Дальнейшее совершенствование конструкции электрических машин и повышение их технико-экономических показателей привело к необходимости усовершенствования систем изоляции для уменьшения толщины изоляции обмоток и повышения надежности работы электрооборудования.

Возможность усовершенствования систем изоляции заключалась в повышении электрических и механических характеристик изоляции с тем, чтобы при уменьшении толщины изоляции сохранить надежность и долговечность ее работы при минимальном по возможности изменении технологического процесса изготовления изоляции «Монолит-2». Принципиально решить эту задачу возможно несколькими путями:

- для повышения электрических характеристик изоляции увеличить содержание ее основного диэлектрического барьера — слюдяной бумаги;
- для повышения электрических, электрофизических характеристик обеспечить полное устранение вытекания пропиточного компаунда из изоляции;
- разработать технологию, обеспечивающую качественную пропитку изоляции и отверждение связующего под давлением с сохранением длительного срока жизни связующего;
- разработать новые типы пропиточных составов, ускорителей отверждения, латентных отвердителей, не вступающих в реакцию при температурах пропитки и очень реакционных при температурах отверждения.

В изоляции основным диэлектрическим барьером является пропитанная компаундом слюдинитовая бумага, которая имеет наиболее высокую электрическую прочность. Компаунд и пропитанная компаундом стеклоткань, служащая в качестве подложек, при толщине образцов не выше 1 мм имеет электрическую прочность порядка 30 кВ/мм. Поэтому для получения предельных электрических характеристик стеклослюдинитовых материалов, пропитанных под вакуумом и давлением эпоксидным компаундом по технологии «Монолит-2», были проведены специальные исследования на плоских образцах. Эти испытания включили в себя определение электрической прочности непропитанного стеклослюдинитового полотна, кратковременной и длительной электрической прочности плоских образцов, изготовленных из этого полотна и пропитанных по технологии «Монолит-2».

В результате испытаний было показано, что применяемые материалы в виде полотна имеют высокие значения электрической прочности (до 54 кВ/мм), в то время как электрическая прочность изготавливаемой изоляции «Монолит-2» составляет 25—27 кВ/мм.

При разработке изоляции «Монолит» уже было известно, что изоляция из непропитанных лент легко подпрессовывается и электрическая прочность при этом повышается. Однако учитывая, что подпрессовка ведет к ухудшению пропитывающей способности изоляции имевшимися к тому времени компаундами, были разработаны новые типы низковязких компаундов, что позволило (см. гл. 2) обеспечить качественную пропитку и подпрессованной изоляции. Прежде

всего необходимо было определить давление при подпрессовке изоляции и построить зависимость толщины изоляции от количества слоев при разном давлении. На рис. 4.112 и 4.113 показана зависимость толщины изоляции на основе ленты ЛСКН-160ТТ толщиной 0,13 мм от числа слоев при давлении 0,1—4,0 МПа.

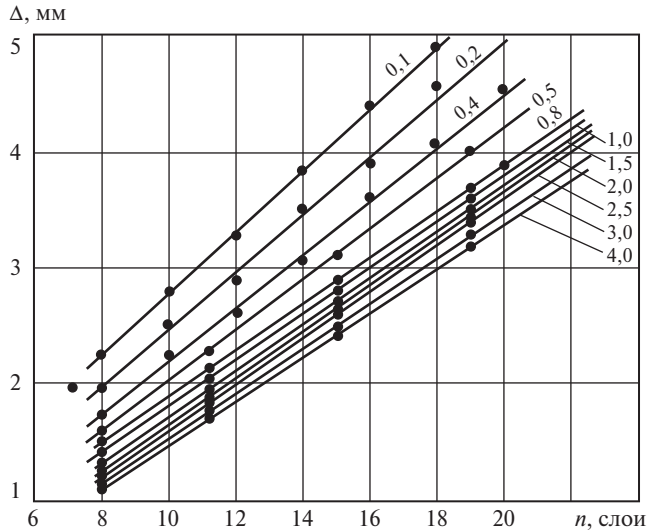


Рис. 4.112. Зависимость толщины изоляции на основе ленты ЛСКН-160ТТ толщиной 0,13 мм от числа слоев при подпрессовке давлением от 0,1 до 4,0 МПа

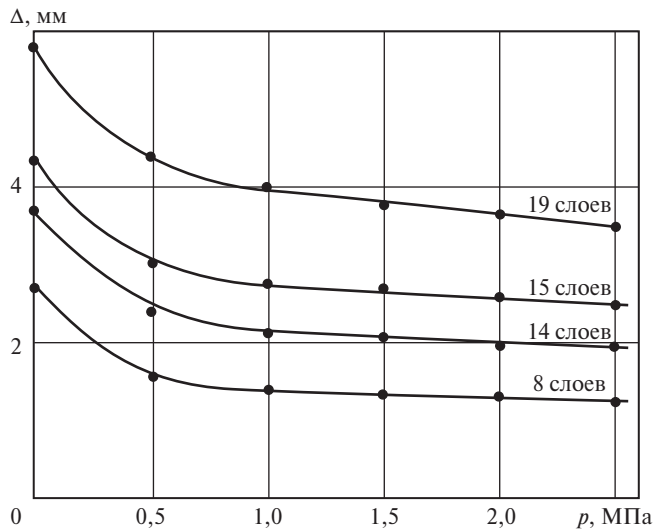


Рис. 4.113. Зависимость толщины изоляции от давления подпрессовки при различном числе слоев ленты ЛСКН-160ТТ толщиной 0,13 мм

Проведенные исследования показали, что большая часть подпрессовки происходит при давлении 0,5—1,0 МПа (до 30 %), дальнейшее повышение давления обеспечивает незначительное увеличение подпрессовки.

Зависимость между давлением и количеством слоев для соответствующей толщины изоляции можно записать уравнением

$$\ln p = ax + b, \quad (4.45)$$

где p — давление при подпрессовке; x — число слоев, a и b — коэффициенты.

Коэффициенты a и b определяют по способу наименьших квадратов. Расчеты для толщины 2, 3 и 4 мм приведены в табл. 4.31—4.33.

Из табл. 4.31 видно, что x_i и y_i — известные величины, a и b — неизвестные, подлежащие определению. Выберем a и b так, чтобы (a, b) имело наименьшее значение:

$$\begin{cases} a \sum x_i^2 + b \sum x_i = \sum x_i y_i; \\ a \sum x_i + b n = \sum y_i. \end{cases} \quad (4.46)$$

Находим a и b и затем подставляем их в эмпирическую формулу (4.45). Получаем для изоляции толщиной 2 мм:

$$\ln p = 0,75x - 5,3.$$

Проведя аналогичные (4.46) действия, получаем для изоляции толщиной 3 мм

$$\ln p = 0,52x - 5,6;$$

для изоляции толщиной 4 мм

$$\ln p = 0,41x - 6.$$

Таблица 4.31

Расчетные данные для подсчета коэффициентов a и b для изоляции толщиной 2 мм

Число слоев ленты	Параметр			
	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	8,0	0,69	64,00	5,52
2	9,0	1,38	81,00	12,42
3	9,5	1,60	90,25	15,20
4	10,0	2,07	100,00	20,07
5	10,5	2,70	110,25	28,35
6	11,0	2,99	121,00	32,89
7	11,5	3,4	132,25	39,10
8	12,0	3,68	144,00	44,16
$n = 8$	$\sum x_i = 81,5$	$\sum y_i = 18,51$	$\sum x_i^2 = 842,75$	$\sum x_i y_i = 197,72$

Таблица 4.32

Расчетные данные для подсчета коэффициентов a и b для изоляции толщиной 3 мм

Число слоев ленты	Параметр			
	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	11,0	0	121,00	0
2	12,0	0,68	144,00	8,28
3	13,0	1,38	169,00	17,94
4	14,0	1,60	196,00	22,40
5	15,0	2,07	225,00	31,05
6	15,5	2,30	240,25	31,65
7	16,0	2,70	256,00	43,20
8	16,5	2,99	272,25	49,34
9	17,0	3,21	289,00	54,57
10	17,5	3,40	306,25	59,50
11	18,0	3,68	324,00	66,24
$n = 11$	$\sum x_i = 165,5$	$\sum y_i = 24,02$	$\sum x_i^2 = 2542,75$	$\sum x_i y_i = 388,17$

Таблица 4.33

Расчетные данные для подсчета коэффициентов a и b для изоляции толщиной 4 мм

Число слоев ленты	Параметр			
	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	15,0	0	225,00	0
2	16,0	0,68	256,00	11,04
3	17,5	1,38	306,25	24,15
4	19,0	1,60	361,00	30,40
5	20,5	2,07	420,25	42,44
6	21,0	2,30	441,00	48,30
7	21,5	2,70	462,25	58,05
8	22,0	2,99	484,00	65,78
9	22,5	3,21	506,25	72,23
10	23,0	3,40	529,00	78,20
11	23,5	3,68	552,25	85,48
$n = 11$	$\sum x_i = 221,5$	$\sum y_i = 24,00$	$\sum x_i^2 = 24\,543,25$	$\sum x_i y_i = 517,00$

В результате расчетов получено три уравнения:

для изоляции толщиной 2 мм

$$\ln p = 0,75x - 5,3;$$

для изоляции толщиной 3 мм

$$\ln p = 0,52x - 5,6; \quad (4.47)$$

для изоляции толщиной 4 мм

$$\ln p = 0,41x - 6.$$

На рис. 4.114 представлены расчетные зависимости уравнений для толщины изоляции 2, 3 и 4 мм; как видно, экспериментальные точки ложатся вблизи расчетной прямой.

Дальнейшие исследования должны были определить влияние подпрессовки на характеристики изоляции. Коэффициент подпрессовки изоляции K , %, рассчитывают по формуле:

$$K = \frac{d_1 n - d_2}{d_1 n} 100, \quad (4.48)$$

где d_1 — толщина ленты, мм; n — число слоев ленты; d_2 — заданная толщина изоляции, мм.

Значения коэффициента K для изоляции макетов толщиной 2 мм в зависимости от количества слоев представлены в табл. 4.34.

Таблица 4.34

Значения коэффициента K

Параметр	Число слоев ленты					
	7	8	9	10	11	12
Коэффициент запрессовки K , %	0	3,8	14,5	23,0	30,0	35,0

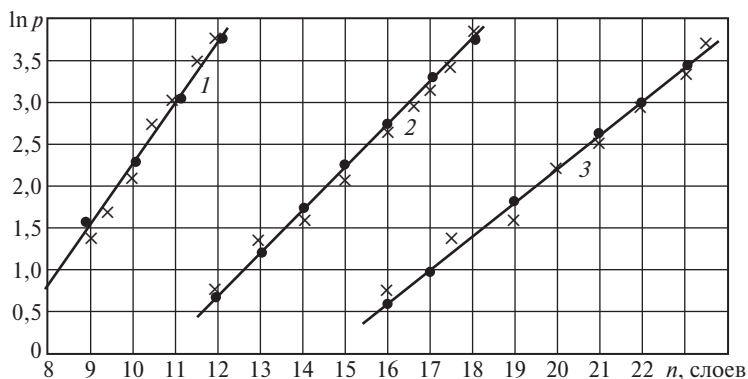


Рис. 4.114. Зависимость p от числа слоев ленты ЛСКН-160ТТ для изоляции толщиной 2 мм (1), 3 мм (2), 4 мм (3):

○ — расчетные точки; × — экспериментальные

На изоляции макетов с различной подпрессовкой были определены следующие характеристики:

- кратковременная и длительная электрическая прочность;
- $\operatorname{tg} \delta$ при температуре 20 и 130 °С при $U_{\text{исп}} = 3; 6 \text{ и } 9 \text{ кВ}$;
- предел прочности при растяжении;
- усилие при изгибе.

Макеты для которых $K = 35 \%$ после пропитки имели белесые разводы (т.е. изоляция оказалась недопропитанной) и были изъяты из дальнейших испытаний.

В табл. 4.35 приведены значения количества связующего.

При увеличении коэффициента K доля связующего в изоляции снижается. На рис. 4.115 приведены данные по изменению состава изоляции в зависимости от значения K .

На рис. 4.116 показаны интегральные распределения значений кратковременной электрической прочности в зависимости от коэффициента K подпрессовки. Проведенные испытания показали, что электрическая прочность повышается с увеличением значения K . Для анализа полученных результатов определялись средние значения электрической прочности изоляции при каждом значении K . Так как только одно среднее значение не дает практически исчерпывающей характеристики случайной величины, то определялись отклонения

Таблица 4.35

Количество связующего в изоляции макетов в зависимости от K

Параметр	Значение				
$K, \%$	0	3,8	14,5	23,0	30
Количество связующего, %	37,5	34,0	31,5	29,0	26,2

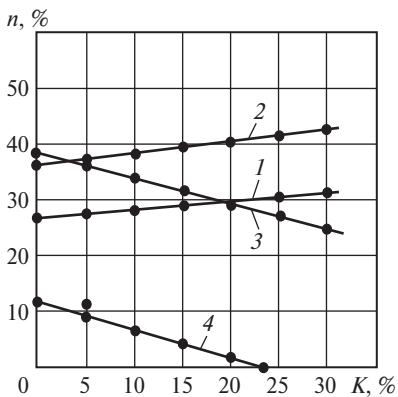


Рис. 4.115. Зависимость процентного содержания слюдинита (кривая 1), стеклоткани (кривая 2), связующего (кривая 3), воздушных включений (кривая 4) от K

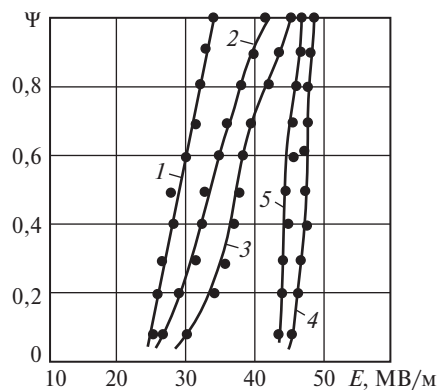


Рис. 4.116. Распределение значений электрической прочности изоляции макетов толщиной 2 мм от K :

1 — 0; 2 — 3,8 %; 3 — 14,5 %; 4 — 23,0 %; 5 — 30 %

Таблица 4.36

Значения X_p, P_i при различных коэффициентах K

Значение K	Значения X_p, P_i								
0	X_i	26	27	28	30	31	32	33	—
	P_i	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	—
3,8	X_{i2}	27	31	32	33	34	36	38	42
	P_i	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$
14,5	X_{i3}	29	33	35	37	40	43	44	46
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$
23,0	X_{i4}	45	46	47	48	49	—	—	—
	P_i	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{4}{10}$	$\frac{1}{10}$	—	—	—
30,0	X_{i5}	43	44	45	46	47	—	—	—
	P_i	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{3}{10}$	—	—	—

отдельных значений случайной величины от ее среднего значения. Результаты исследований считаются удачными, если X определяется при незначительных отклонениях $X - \bar{X}$.

На основе полученных данных составлена таблица значений $E_{\text{пр}}$ при различных коэффициентах K (табл. 4.36).

Подставляя данные табл. 4.36 в формулу $\bar{X} = X_i P_i + X_{i2} P_i + \dots + X_{in} P_i$, получаем следующие значения:

$$\bar{X} = 29,2;$$

$$\bar{X}_2 = 33,9;$$

$$\bar{X}_3 = 38,1;$$

$$\bar{X}_4 = 47;$$

$$\bar{X}_5 = 45,2.$$

Значения электрической прочности изоляции при коэффициенте K равном 23 и 30 % подпрессовки характеризуются малым рассеянием по сравнению с остальными.

Таблица 4.37

Результаты отклонений X_i , $\bar{X}_i$ и P_i от средних значений

Значения K	Значения $X_i - \bar{X}$; P_i								
0	$X_{i1} - \bar{X}_{i1}$	-3,2	-2,2	-1,2	0,8	1,8	2,8	3,8	—
	P_i	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	—
3,8	$X_{i2} - \bar{X}_{i2}$	-6,9	-2,9	-1,9	-0,9	1,1	2,1	4,1	8,1
	P_i	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$
14,5	$X_{i3} - \bar{X}_{i3}$	-9,1	-5,1	-3,1	-1,1	1,9	4,9	5,9	7,9
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$
23,0	$X_{i4} - \bar{X}_{i4}$	-2	-1	0	1	2	—	—	—
	P_i	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{4}{10}$	$\frac{1}{10}$	—	—	—
30,0	$X_{i5} - \bar{X}_{i5}$	-2,2	-1,2	-0,2	0,8	1,8	—	—	—
	P_i	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{3}{10}$	—	—	—

Для оценки фактических отклонений составим таблицу отклонений результатов от среднего $X_i - \bar{X}$ (табл. 4.37).

Так как среднее значение отклонения всегда равно нулю, то оно не может дать характеристики рассеяния случайной величины. Этой цели может служить среднее значение абсолютной величины отклонения $\overline{(X_i - \bar{X})}$:

$$\overline{(X_i - \bar{X})} = \sum_i (X_i - \bar{X}) P_i, \quad (4.49)$$

которое называется средним отклонением. Среднее отклонение определяется по табл. 4.38.

Используя данные табл. 4.38, получаем следующие значения:

$$\overline{(X_1 - \bar{X}_1)} = 2,2;$$

$$\overline{(X_2 - \bar{X}_2)} = 3,9;$$

Таблица 4.38

Среднее отклонение значений

Значение K	Значения $X_i - \bar{X}$; P_i								
0	$(X_{i1} - \bar{X}_{i1})$	0,8	1,2	1,8	2,2	2,8	3,2	3,8	—
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	—
3,8	$(X_{i2} - \bar{X}_{i2})$	0,9	1,1	1,9	2,1	2,9	4,1	6,9	8,1
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$
14,5	$(X_{i3} - \bar{X}_{i3})$	1,1	1,9	3,1	4,9	5,1	5,9	7,9	9,1
	P_i	$\frac{3}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$
23,0	$(X_{i4} - \bar{X}_{i4})$	0	1	2	—	—	—	—	—
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{6}{10}$	$\frac{3}{10}$	—	—	—	—	—
30,0	$(X_{i5} - \bar{X}_{i5})$	0,2	0,8	1,2	1,8	2,2	—	—	—
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{2}{10}$	—	—	—

$$\overline{(X_3 - \bar{X}_3)} = 4,12;$$

$$\overline{(X_4 - \bar{X}_4)} = 1,2;$$

$$\overline{(X_5 - \bar{X}_5)} = 1,4.$$

Найдем среднее квадратичное отклонение, которое называется дисперсией случайной величины $D(x)$,

$$D(x) = \overline{(X_i - \bar{X})^2} = \sum_i (X_i - \bar{X})^2 P_i. \quad (4.50)$$

Среднее дисперсионное квадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\sum_i (X_i - \bar{X})^2 P_i}. \quad (4.51)$$

Составим таблицу средних квадратичных отклонений (табл. 4.39).

Используя данные табл. 4.39, получаем: $\sigma_1 = 2,40$; $\sigma_2 = 4,61$; $\sigma_3 = 4,97$; $\sigma_4 = 1,34$; $\sigma_5 = 1,53$.

Таким образом, по результатам испытаний электрической прочности изоляции с различным значением K можно сделать вывод, что подпрессовка увеличивает кратковременную электрическую прочность от $29 \pm 2,2$ кВ/мм при $K = 0$ до $47 \pm 1,2$ кВ/мм при $K = 23$. При дальнейшем увеличении значения K электрическая прочность уменьшается. Наряду с увеличением электрической прочности изоляции при $K = 23$ уменьшается среднее и среднеквадратическое отклонение значений $E_{\text{пр}}$ по сравнению со значениями $E_{\text{пр}}$ у изоляции с $K = 0$. Это указывает на то, что наиболее стабильные и высокие характеристики электрической прочности изоляции появляются при ее подпрессовке на 23 %.

Испытания на длительную электрическую прочность при $E = 12$ кВ/мм (см. рис. 4.116) показали, что с увеличением значения K увеличивается электрическая прочность. Максимальные значения были зафиксированы у изоляции макетов с $K = 23$ %.

Таблица 4.39

Значения среднеквадратичных отклонений

Значение K	Значения $X_i - \bar{X}$; P_i								
0	$(X_{i1} - \bar{X}_{i1})^2$	0,64	1,44	3,24	4,84	7,84	10,24	14,44	—
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$	—
3,8	$(X_{i2} - \bar{X}_{i2})^2$	0,81	1,21	3,61	4,41	8,41	16,81	47,61	65,61
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{1}{10}$
14,5	$(X_{i3} - \bar{X}_{i3})^2$	1,21	3,61	9,61	24,01	26,01	34,81	62,41	82,81
	P_i	$\frac{3}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$
23,0	$(X_{i4} - \bar{X}_{i4})^2$	0	1	1	—	—	—	—	—
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{6}{10}$	$\frac{3}{10}$	—	—	—	—	—
30,0	$(X_{i5} - \bar{X}_{i5})^2$	0,04	0,64	1,44	1,24	4,84	—	—	—
	P_i	$\frac{1}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{2}{10}$	—	—	—

Значения $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ у изоляции макетов с $K = 0 \div 30$ % при температурах 20 и 130 °С оказались практически одинаковыми (табл. 4.40).

В табл. 4.41 приведены результаты определения механических характеристик изоляции макетов в зависимости от коэффициента K подпрессовки.

Результаты испытаний показали, что и механические характеристики изоляции изменяются в зависимости от значения K подпрессовки.

Была также рассмотрена возможность оптимизации свойств изоляции. Предположим, что все характеристики изоляции на начало эксперимента, а также параметры технологии ее получения постоянны. Будем варьировать только числом слоев (эту величину и считаем входной). К оптимизируемым величинам (выходным параметрам) отнесем наиболее важные критерии качества изоляции: электрические и механические характеристики.

Данные механических испытаний представлялись в виде усредненных значений (с небольшим разбросом), так же как и данные по содержанию связующего. Электрические данные давались в виде выборок из 10—20 значений. Причем, если для времени электрического старения изоляции изменения достигали сотни процентов, то для порчности $E_{\text{пр}}$ можно было проводить усреднение, как для механических характеристик.

Значительные изменения характеристики электрического старения потребовали применения более сложного аппарата, чем простое усреднение. С помощью критерия Пирсона исследовалась нормальность распределения. Распреде-

Таблица 4.40

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения при различных температурах

Коэффициент K , %	$\operatorname{tg} \delta$ при температуре 20 °С			$\operatorname{tg} \delta$ при температуре 130 °С		
	3 кВ	6 кВ	9 кВ	3 кВ	6 кВ	9 кВ
0	0,05	0,012	0,024	0,045	0,055	0,055
30	0,010	0,010	0,011	0,050	0,056	0,560

Таблица 4.41

Значения механических характеристик изоляции в зависимости от коэффициента подпрессовки

Значение K , %	Предел прочности при растяжении, 10^5 Н/м ²		Усилие при изгибе, 10^5 Н/м ²		Модуль упругости при изгибе, 10^5 Н/м		Удельная ударная вязкость при 20 °С, 10^3 Н/м
	20 °С	100 °С	20 °С	100 °С	20 °С	100 °С	
0	790	655	1614	1433	1,27	1,19	20,7
3,8	870	758	1830	1085	1,42	0,98	25,2
14,5	889	742	1759	1335	1,44	1,11	34,0
23,0	1127	777	1794	826	1,48	0,89	36,0
30,0	918	587	1354	842	1,44	0,99	37,4

ление оказалось далеко от нормального ($x_{\text{расч}}^2 \gg x_{\text{табл}}^2$). Следовательно, нельзя брать усредненную характеристику. Путем выборки наиболее вероятного значения Me данных показано, что численное значение, характеризующее с достаточной точностью всю выборку, лежит вблизи полученных данных образца с номером, равным или больше половины выборки. Поэтому для определения длительной электрической прочности совсем необязательно проводить эксперимент до конца (табл. 4.42).

Нельзя строить математические модели процесса (в данном случае функции свойства $Me = f(n)$), если переменная n и функция пропорциональны (линейно коррелируют). Поэтому каждый выходной параметр был исследован на корреляционную зависимость от n . Коэффициент корреляции $P \neq 1$. Возможно получение уравнения регрессии. Подбор уравнения регрессии проводился по методу наименьших квадратов. Для плавных экстремумов более подошли полиномиальные зависимости. Для крутых и более резко меняющихся характеристик были выбраны сочетания экспонент.

Полученные уравнения исследовались на адекватность по критерию Фишера, а значимость коэффициентов уравнения регрессии — по критерию Стьюдента. Если уравнение получалось неадекватным экспериментальным данным, то модель менялась: добивались, чтобы табличный критерий Фишера для 95 %-ной степени вероятности был больше расчетного (табл. 4.43).

Корректировка модели по критерию Стьюдента сводилась к отбрасыванию членов уравнения, у которых табличный критерий Стьюдента гораздо больше расчетных (табл. 4.44).

Как видно из обобщенных данных рис. 4.117—4.119 большинство зависимостей характеристик проходит через максимум. Исключение составляет процент связующего, что очевидно из опытных данных. В целом максимум как

Таблица 4.42

Расположение наиболее вероятного значения $E_{\text{пр}}$ (Me) в наборе экспериментальных данных

Номер образца	Число точек	$E_{\text{пр}}$	Me
1	20	9	11
2	10	5	6
3	10	5	6
4	20	10	11
5	20	10	11
6	10	4	5
7	7	3	5
8	20	10	11

электрических, так и механических свойств для изоляции толщиной 2 мм проходит в области 10 слоев, что соответствует 23 % запрессовки.

Полученные таким путем модели были использованы для последующей оптимизации по числу слоев.

Также были проведены структурные исследования шлифов среза изоляции с различным коэффициентом подпрессовки на электронном микроскопе с 500-кратным увеличением и измерена толщина слюдяной бумаги и стеклоткани. На рис 4.120—4.124 представлены фотографии шлифов, а в табл. 4.45 — результаты измерений. Полученные результаты показывают, что при подпрес-

Таблица 4.43

Данные результатов проверки адекватности моделей по критерию Фишера

Характеристика	F-критерий	
	$P_{\text{расч}}$	$P_{\text{табл}}$
Электрическая прочность, $E_{\text{пр}}$	0,015	4,10
Длительная электрическая прочность $E_{\text{ст}}$	3,578	4,36
Процент связующего	1,132	4,35
Усилие разрыва при 20 °С	3,937	4,10
Усилие разрыва при 100 °С	0,170	4,20
Усилие изгиба при 20 °С	0,124	4,10
Усилие изгиба при 100 °С	0,215	4,10

Таблица 4.44

Примеры проверки значимости коэффициентов уравнений регрессии

Характеристика	Коэффициенты уравнений		
	B_0X_1	B_1X_2	B_2X_3
Количество связующего	95,065	−11,418 хп	+0,474 хп ²
2,09*	172,06	20,67	0,85**
$E_{\text{пр}}$	−104,479	+31,178 хп	−1,609 хп ²
1,96*	139,816	41,724	2,15

* Табличные значения критерия Стьюдента (t -критерия).

** Незначительный коэффициент.

Таблица 4.45

Результаты измерений на электронном микроскопе

Толщина бумаги	Коэффициент подпрессовки, %				
	0	3,8	14,5	23	30
Толщина слюдяной бумаги, мкм	58	51	47	46	44
Толщина двойной стеклоткани, мкм	82	79	63	60	51

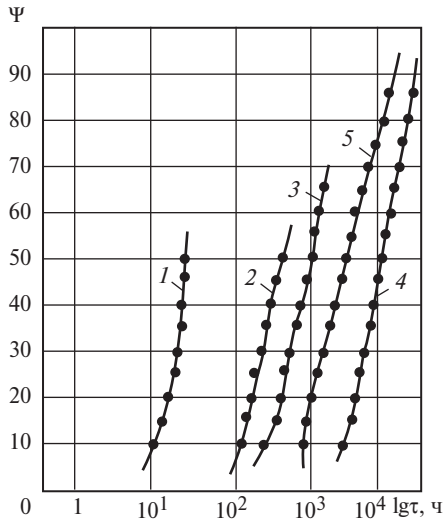


Рис. 4.117. Интегральные кривые распределения сроков жизни изоляции на ленте ЛСКН-160ТТ от числа слоев при $E = 12$ кВ/мм:

1 — 7 слоев; 2 — 8 слоев; 3 — 9 слоев; 4 — 10 слоев; 5 — 11 слоев

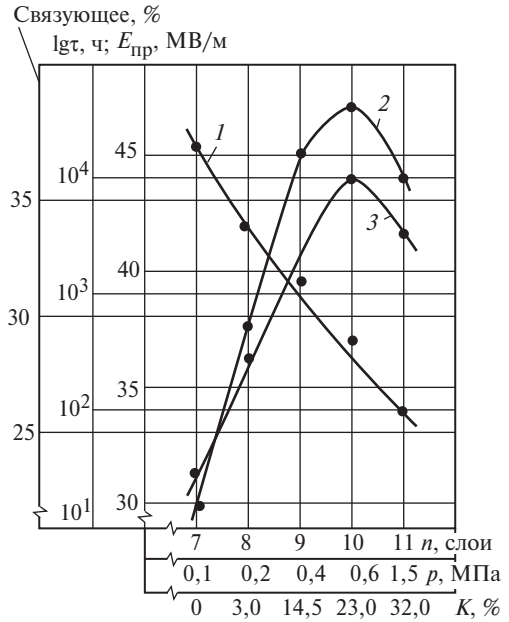


Рис. 4.118. Данные результатов испытаний изоляции в зависимости от коэффициента K подпрессовки:

1 — процент связующего; 2 — электрическая прочность; 3 — длительная электрическая прочность

Рис. 4.119. Результаты испытаний изоляции в зависимости от подпрессовки:

1 — усилие разрыва $\sigma_{\text{разр}}$, 10^3 Н/см², при 20 °С;
2 — усилие разрыва $\sigma_{\text{разр}}$, 10^3 Н/см², при 100 °С;
3 — усилие изгиба $\sigma_{\text{изг}}$, 10^4 Н/см², при 20 °С;
4 — модуль упругости $M_{\text{упр}}$, 10^5 Н/см², при 20 °С;
5 — удельная ударная вязкость $\vartheta_{\text{уд}}$, Н/см², при 20 °С

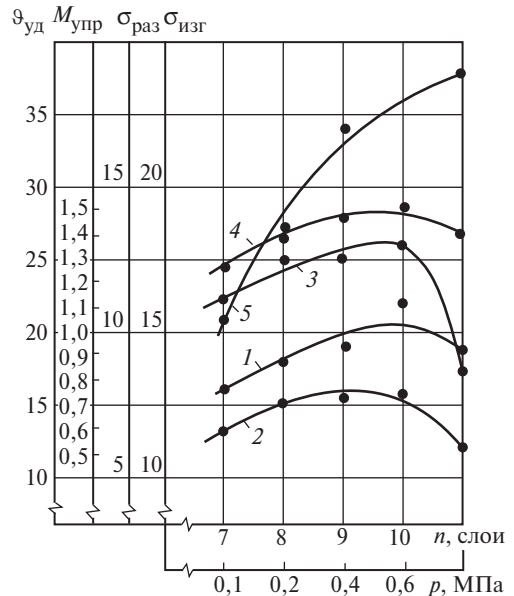




Рис. 4.120. Фото шлифа среза изоляции без подпрессовки



Рис. 4.121. Фото шлифа среза изоляции с подпрессовкой 3,8 %



Рис. 4.122. Фото шлифа среза изоляции с подпрессовкой 14,5 %

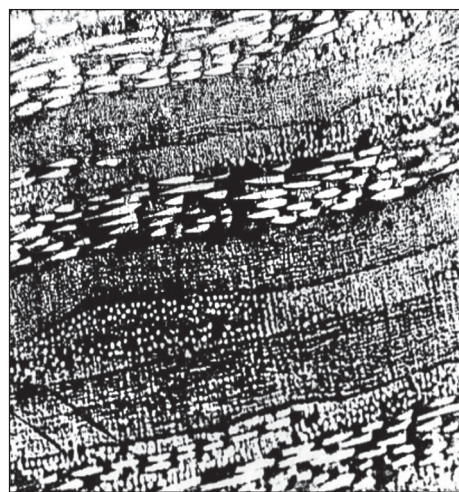


Рис. 4.123. Фото шлифа среза изоляции с подпрессовкой 23,0 %



Рис. 4.124. Фото шлифа среза изоляции с подпрессовкой 30 %

Таблица 4.46

Результаты определения кратковременной и длительной электрической прочности изоляции макетов с различным значением K

Значения K подпрессовки, %	Время τ , ч, выдержки образцов № 1—6 при $U_{\text{исп}} = 15$ кВ, $S = 10$ мм						$E_{\text{пр}}$, кВ/мм, $S = 10$ мм среднее из шести макетов
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	
0	30	128	240	344	411	420	3,0
3,8	30	150	300	380	420	460	3,6
14,5	100	200	345	468	522	603	5,4
23,0	64	180	540	730	800	820	5,8
30,0	64	100	204	305	360	380	5,6

совке происходит увеличение упорядоченности структуры изоляции. При этом более плотная слюдинитовая бумага подпрессовывается на 15 %, а более рыхлая стеклоткань — на 38 %. В связи с этим представляло интерес исследование изменения электрической прочности вдоль слоев. Для этого были изготовлены макеты со встроенными электродами в виде полосы шириной 10 мм и радиусом закругления 5 мм из медной фольги. Расстояние S между электродами составляло 10 мм. Определялись значения кратковременной и длительной электрической прочности изоляции макетов с различным коэффициентом K подпрессовки (табл. 4.46).

Результаты испытаний показывают, что кратковременная и длительная электрическая прочность повышается по мере увеличения значения K подпрессовки. Максимальные значения $E_{\text{пр}}$ и τ у образцов с $K = 23$ %.

Сопоставляя результаты определения пробивного напряжения вдоль и поперек слоев и сравнивая их соотношения при различных K можно наблюдать, произошли ли какие-либо нарушения в структуре слюдинитовой бумаги как основ-

ного диэлектрического барьера изоляции. Экспериментально показано, что электрическая прочность слюдинитовой изоляции зависит от характера распределения чешуек слюды в слюдинитовой бумаге. Слюдинитовая изоляция имеет максимальную электрическую прочность в том случае, когда элементарные чешуйки слюды расположены нормально к направлению электрического поля. Поэтому необходимо было выяснить, нарушается ли первоначальное положение чешуек слюды при различных $K_{эфф}$. Косвенно это можно определить изменением отношения m

$$m = \frac{E_{пр1}}{E_{пр2}}, \quad (4.52)$$

где $E_{пр1}$ — электрическая прочность образца поперек слоев, кВ/мм; $E_{пр2}$ — электрическая прочность образца вдоль слоев, кВ/мм.

Установлено, что в процессе подпрессовки отношение m изменяется незначительно. Это свидетельствует о сохранении структуры слюдяной бумаги. Как показали проведенные испытания, оптимальные свойства изоляции «Монолит-2» получаются на макетах с коэффициентом $K_{эфф} = 23 \%$. Однако, учитывая, что непропитанная изоляция обладает упругими свойствами и при снятии давления принимает первоначальные геометрические размеры, необходимо было зафиксировать ее геометрические размеры после подпрессовки. Было найдено решение, заключающееся в том, что поверх изоляции наносили слой пропитанной стеклоткани или стеклоленты с содержанием связующего 20—25 %. Стеклоленту наносили с зазором 2—10 мм. После этого обмотку помещали в пресс при температуре, обеспечивающей полимеризацию связующего в стеклоленте. После полимеризации образовавшаяся стеклопластиковая «коробочка» обеспечивала сохранение размера изоляции. Кроме того, она уменьшала повреждаемость изоляции в процессе укладки катушек в статор двигателя.

Рассмотрим, за счет каких показателей подпрессовка увеличивает электрическую прочность.

Воздействие на обмотку электрического поля является одним из основных факторов, определяющих ее срок службы. Электрическое старение изоляции происходит из-за повреждающего действия частичных разрядов (ЧР), появляющихся в газовых включениях. Изоляция «Монолит-2» статорных обмоток состоит из чередующихся слоев диэлектриков: стеклоткани, слюдобумаги, эпоксидного компаунда. В ней, как во всякой технической изоляции, неизбежно образование газовых (воздушных) включений (рис. 4.125).

Одним из условий уменьшения воздушных включений в изоляции является продолжительная ее вакуумирование, а также вакуумирование пропиточного компаунда. Если учесть, что газовые включения в слоевой изоляции имеют протяженный характер в виде полости, то понизить вероятность образования ЧР возможно путем уменьшения протяженности полостей и снижения их общего количества в изоляции, например, ее подпрессовкой.

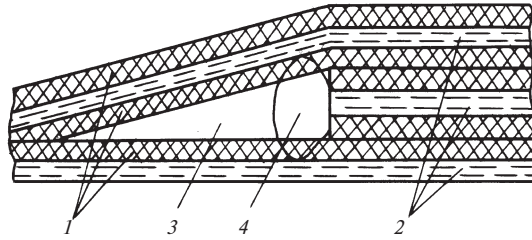


Рис. 4.125. Модель структуры изоляции «Монолит-2», выполненной лентой ЛСКН-160ТТ с перекрытием в 1/2:

1 — стеклянные подложки толщиной 0,04 мм; 2 — слюдяная бумага толщиной 0,01 мм; 3 — эпоксидный компаунд; 4 — возможное воздушное (газовое) включение

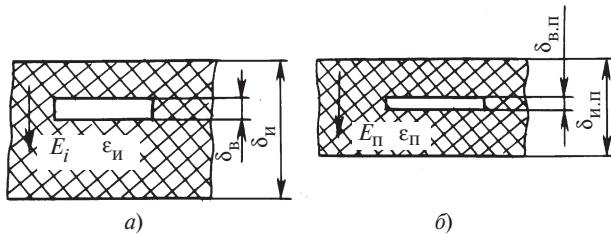


Рис. 4.126. Неподпрессованная изоляция «Монолит-2» (а) и подпрессованная изоляция «Монолит-4» (б):

$\delta_{и}$, $\delta_{и.п}$ — толщина изоляции; $\delta_{в.п}$, $\delta_{и.п}$ — толщина воздушных (газовых) включений; $\epsilon_{и}$, $\epsilon_{п}$ — диэлектрические проницаемости; E_i , $E_{п}$ — напряженности внешнего поля возникновения частичных разрядов

Микрошлифы неподпрессованной и подпрессованной изоляции (см. рис. 4.120—4.124) показывают, что толщина стеклотканевых подложек при подпрессовках остается неизменной, а толщина слюдинитового слоя и компаунда в подпрессованной изоляции уменьшается. При выполнении изоляции лентой ЛСКН-160ТТ ($\delta = 0,13$ мм вполнахлеста) можно предположить, что предельная толщина газовых включений в неподпрессованной изоляции составляет $\delta_{в} \leq (130 + 40 + 40) \leq 210$ мкм, а при подпрессовке, например на 20 %, $\delta_{в.п} \leq 170$ мкм.

Рассмотрим несколько характеристик ЧР неподпрессованной и подпрессованной изоляции (рис. 4.126). Коэффициент увеличения напряженности поля в газовых включениях

$$K_E = \frac{E_{в}}{E_{ср}} = \frac{1 + K_{\delta}}{K_{с.п} + K_{\delta}}, \quad (4.53)$$

где $K_{\delta} = \frac{\delta_{в}}{\delta_{и}}$ или $\frac{\delta_{в.п}}{\delta_{и.п}}$; $\delta_{и} = 5,5$ мм, $\delta_{и.п} = 4,2$ мм — опытные данные неподпрессованной и подпрессованной изоляции стержней гидрогенератора на напряжение

$U_{\text{ном}} = 15,75$ кВ; K_{δ} — коэффициент напряженности стержня; $K_{\text{с.п}} = \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{и}}}$ или $\frac{\varepsilon_{\text{в.п}}}{\varepsilon_{\text{п}}}$,

где диэлектрическая проницаемость изоляции стержней определялась опытным путем, для неподпрессованной изоляции $\varepsilon_{\text{и}} = 4,2$; а для подпрессованной изоляции $\varepsilon_{\text{п}} = 5,3$. Тогда, после преобразований (4.53), получаем

$$K_{\delta} = \frac{0,21}{5,5} = 3,8 \cdot 10^{-2}; \quad K_{\delta\text{п}} = 4,05 \cdot 10^{-2};$$

$$K_{\text{с}} = \frac{1}{4,2} = 0,24; \quad K_{\text{с.п}} = 0,19.$$

Коэффициенты неопрессованной и подпрессованной изоляции равны

$$K_{\text{в}} = 3,6; \quad K_{\text{в.п}} = 4,5.$$

Напряженность поля во включениях неподпрессованной изоляции

$$E_{\text{в}} = K_{\varepsilon} E_{\text{ср}} = 3,6 E_{\text{ср}}. \quad (4.54)$$

Напряженность неравномерно распределена по толщине изоляции из-за малого радиуса кривизны внутреннего электрода. Наибольшее значение напряженности E_{max} можно оценить (рис. 4.127) из условия:

$$E_{\text{max}} = \frac{U_i}{r \ln \frac{R}{r}}. \quad (4.55)$$

Напряжение внешнего поля при возникновении частичных разрядов в неподпрессованной изоляции ($R = 7$ мм, $r = 1,5$ мм, $\delta_{\text{и}} = 5,5$ мм) составило $U_{i(50\%)} = 7,7$ кВ, $E_i = 1,4$ кВ/мм. Измерения ЧР выполнены на 50 стержнях. Таким образом, напряженности в газовых включениях имели следующие значения:

$E'_{\text{в}} = 3,6 \cdot 3,3\sqrt{2} = 18$ кВ/мм — для включений у радиуса внутреннего электрода;

$E'_{\text{в}} = 7,2$ кВ/мм — для включений в плоской части.

При нормальных условиях (температуре, давлении) и напряженности поля 18 кВ/мм может наблюдаться пробой воздушного промежутка не менее 30 мкм,

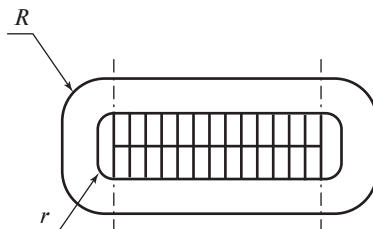


Рис. 4.127. Поперечное сечение стержня

при 7,5 кВ/мм не менее 180 мкм. При давлении, например, $3 \cdot 10^5$ Па и при $E = 18$ кВ/мм пробьется воздушный промежуток не менее 120 мкм, при 7,5 кВ/мм не будет происходить пробоя. Если исходить из положения об уменьшении давления газа в неизменном объеме при переходе от температуры запекания изоляции (130 °С) к нормальной температуре (20 °С), при которой производились измерения ЧР, то уменьшение давления K_p составит:

$$K_p = \frac{p_{20}}{p_{130}} = \frac{t_{20}}{t_{130}} = 0,72. \quad (4.56)$$

С учетом последнего можно оценить толщину газовых включений, в которых могут возникать ЧР (табл. 4.47).

Из данных таблицы видно, что диапазон толщины полостей, в которых возникают ЧР, находится вблизи толщины одной стеклослюдинитовой ленты (130 мкм) и составляющей ее стеклоткани (40 мкм). Точнее оценить толщину полостей не представляется возможным из-за отсутствия данных о составе и давлении газов во включениях и их электрической прочности.

В связи с тем что состав газа и его давление в газовых полостях в неподпрессованной и подпрессованной изоляции одинаковы:

$$E_b = E_{b,п}, \quad (4.57)$$

то напряженность внешнего поля, при которой возникнут ЧР в подпрессованной изоляции,

$$E_{i,п} = \frac{E_i K_\varepsilon}{K_{\varepsilon,п}} = \frac{1,4 \cdot 3,6}{4,5} = 1,18 \text{ кВ/м}. \quad (4.58)$$

Таким образом, при подпрессовке изоляции, например, на 20 % напряженность $E_{i,п}$ уменьшается примерно на 15 %, что объясняется увеличением диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{п}$ подпрессованной изоляции за счет увеличения удельного содержания слюды ($\varepsilon = 7$).

В экспериментах при измерении ЧР на 30 стержнях с подпрессованной изоляцией получены значения $E_{i,п} = 1$ кВ/мм ($U_{i,п} = 4,2$ кВ), что согласуется с расчетными данными.

На рис. 4.128 приведены результаты исследования влияния предварительной подпрессовки изоляции на интенсивность ЧР. Средняя напряженность возник-

Таблица 4.47

Минимальное значение толщины воздушных (газовых) включений при их пробое для различных давлений во включениях во время запекания, мкм

Место расположения воздушной (газовой) полости	Давление		
	$p = 10^5$ Па	$p = 3 \cdot 10^5$ Па	$p = 5 \cdot 10^5$ Па
У края внутреннего электрода $E_b = 18$ кВ/мм, не менее	30	120	160
В плоской части $E_b = 18$ кВ/мм, не менее	180	—	—

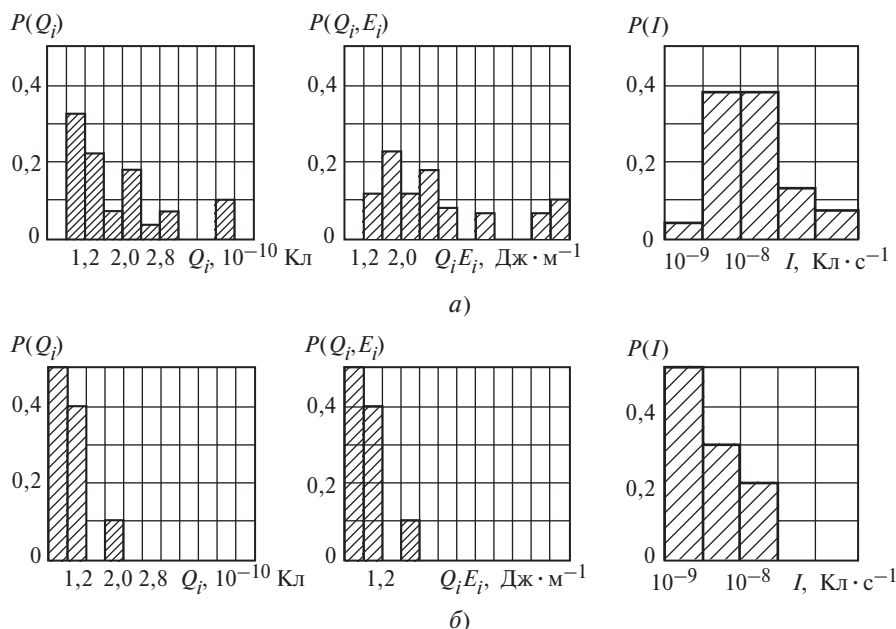


Рис. 4.128. Характеристики ЧР в неподпрессованной (а) и подпрессованной (б) изоляции (I — средний ток ЧР; Q — максимальный кажущийся заряд)

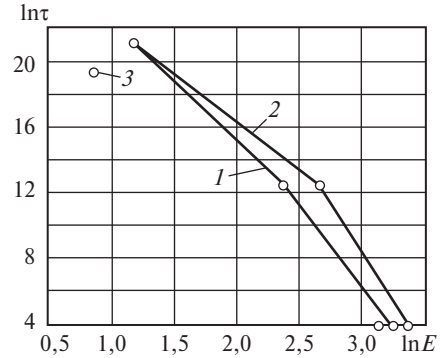
новения ЧР кажущегося заряда $(3 \div 4) \cdot 10^{-11}$ Кл исследуемой подпрессованной изоляции $E_{\text{ип}}$ несколько меньше средней напряженности возникновения ЧР неподпрессованной изоляции $E_{\text{ин}}$, что можно объяснить увеличением относительной диэлектрической проницаемости (до 5,5) за счет уменьшения содержания эпоксидного компаунда — компонента с меньшей диэлектрической проницаемостью по сравнению со слюдой и стеклолентой. Приведенные экспериментальные данные показывают, что интенсивность начальных ЧР и их энергетические характеристики (кажущийся заряд Q , ток I , энергия кажущегося заряда QE_i) в подпрессованной изоляции меньше, чем в неподпрессованной.

Проведенные исследования электрической прочности $E_{\text{пр}}$ и времени жизни τ изоляции также показывают, что значения $E_{\text{пр}}$ и τ существенно возрастают по мере увеличения подпрессовки изоляции. Важным обстоятельством в сохранении высоких свойств изоляции является соблюдение технологии ее изготовления. Нарушение технологии может приводить к понижению минимальных значений электрической прочности и времени жизни изоляции, приближающихся к значениям $E_{\text{пр}}$ и τ неподпрессованной изоляции.

Кривые времени жизни изоляции, основанные на данных большого числа экспериментальных исследований при напряжении с частотой 50—2400 Гц, многочисленных пусках опытных образцов электрических машин, т.е. с учетом электродинамических усилий, развиваемых в стержнях обмоток, и эксплуата-

Рис. 4.129. Время жизни изоляции «Монолит-2»:

1 — зависимость $\ln \tau (\ln E)$, построенная по минимальным значениям τ ; 2 — зависимость $\ln \tau (\ln E)$, построенная по средним значениям τ ; 3 — экспериментальные значения τ изоляции двигателей, находящихся в опытно-промышленной эксплуатации и не вышедших из строя пробоя изоляции.



ции опытных образцов, представлены на рис. 4.129. Оценка времени жизни при $E = 3,3$ кВ/мм ($\ln E = 1,19$), приведенного к частоте 50 Гц, производилась по выражению:

$$\tau = t_{50} + t_f \frac{f}{50}, \quad (4.59)$$

где t_{50} — время воздействия на изоляцию напряжения частотой 50 Гц; t_f — время воздействия на изоляцию напряжения повышенной частоты; f — частота воздействующего напряжения, Гц.

Следует ожидать, что в этом случае оценка времени жизни τ , эквивалентного по воздействию напряжения 50 Гц, произведена по минимальным значениям.

Время жизни исследованной изоляции описывается зависимостью:

$$\tau = A E^{-m}, \quad (4.60)$$

где для участка, характеризующегося медленным процессом разрушения под действием ЧР в диапазоне напряженностей 3,3—10 кВ/мм, коэффициент $A = 7,3 \cdot 10^{12}$ кВ⁻¹ · с · мм; m — показатель степени.

Следовательно, подпрессовкой перед пропиткой многослойной изоляции «Монолит-2» можно уменьшить размеры возможных воздушных полостей в направлении внешнего поля. Одновременно подпрессовка приводит к уменьшению общей толщины изоляции, т.е. к увеличению коэффициента заполнения паза медью K_z и к снижению поля допусков изолированной обмотки.

Статистический анализ изготовления натуральных обмоток с изоляцией «Монолит-2», позволил установить следующие закономерности:

- при изолировании происходит неплотное наложение слоев ленты ЛСКН-160ТТ на широкие стороны катушек (стержней). Неплотности для катушек составляют 0,3 мм на две стороны;
- при изолировании происходит подпрессовка (утяжка) примерно на 10 % расчетной толщины лент ЛСКН-160ТТ на узких гранях и на ребрах катушек.

Вышеизложенное явилось предпосылкой для исследования возможностей предварительной подпрессовки (утончения) изоляции обмоток перед пропиткой. В настоящее время разработан способ изготовления катушек с подпрессованной изоляцией, который заключается в следующем:

- на изоляцию в пазовых частях катушек наносится слой пропитанной стеклолаколенты с зазором, обеспечивающим последующую пропитку;

• изоляция в пазовых частях катушек подпрессовывается при температуре 120—150 °С и давлении, позволяющем получить расчетный размер изоляции в течение времени, необходимого для полимеризации связующего в стеклолаколенте.

Для реализации предложенного способа решались следующие задачи:

- определение удельных давлений для подпрессовок;
- исследование перераспределения толщины изоляции по периметру сечения катушек (стержней);
- отработка режимов подпрессовки;
- исследование влияния подпрессовок на свойства непропитанной и пропитанной изоляции;
- выбор оптимального размера (по ширине сечения в пазовой части) катушек для укладки в пазы;
- оценка качества пропиток.

Удельное давление для подпрессовок определялось на изоляции катушек, натуральных стержней. Коэффициент подпрессовки изоляции, %, рассчитывался по формуле:

$$K_{\text{п}} = \frac{\delta_{\text{п}}}{\delta_{\text{расч}}} 100 = \frac{\delta}{2 \cdot 0,13n} 100, \quad (4.61)$$

где $\delta_{\text{п}}$ — толщина подпрессованной изоляции, мм; 0,13 — толщина ленты ЛСКН-160ТТ, мм; n — число слоев ленты ЛСКН-160ТТ; 2 — коэффициент, учитывающий наложение ленты ЛСКН-160ТТ в полнахлеста.

На рис. 4.130 приведены значения удельных давлений для подпрессовки сухой изоляции для на различных $K_{\text{п}}$. Как и предполагалось, в связи с допусками $\pm 0,015$ мм для лент ЛСКН-160ТТ и $\pm 0,2$ мм для неизолированных катушек удельные давления также имеют поле допусков.

Из опробованных схем подпрессовок лучшие результаты по полю допусков размеров сечения пазовых частей катушек получаются при подпрессовках в замок (рис. 4.131). В качестве технологической ленты применялась подсушенная стеклолаколента толщиной 0,1 мм, пропитанная эпоксидно-фенольным лаком. Подпрессовку изоляции с использованием этой стеклолаколенты осуществляют следующим образом: вначале проводят горячую подпрессовку в течение 15 мин при температуре 120—130 °С, а затем охлаждают под давлением до температуры окружающей среды в течение 5 мин. Катушки, подпрессованные таким способом и хранящиеся в течение 6 мес в изоляционно-обмоточном цехе, сохраняют подпрессованный размер изоляции.

Для выбора оптимальных размеров ширины катушки после подпрессовки $B_{\text{к}}$, ширины клина и планки $B_{\text{кл}}$ (см. рис. 4.131) для заданной ширины паза в свету $B_{\text{п}}$ были проведены исследования по подпрессовке изоляции с разными размерами $B_{\text{кл}}$, с защитной киперной лентой и без нее. Эксперименты проводились на 400 катушках с подпрессованной изоляцией для статорных обмоток

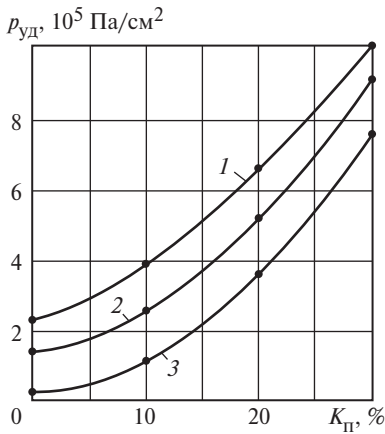


Рис. 4.130. Зависимость удельных давлений подпрессовки «сухой» изоляции, выполненной в семь-восемь слоев ленты ЛСКН-160ТТ, от коэффициента подпрессовки $K_{\text{п}}$:

1 — минимальные значения; 2 — средние (50 %);
3 — минимальные значения

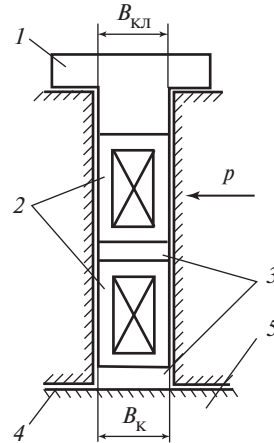


Рис. 4.131. Схема подпрессовки изоляции пазовых частей катушек в замок:

1 — клин; 2 — пазовые части катушек; 3 — планки; 4, 5 — детали пресса

опытно-промышленной партии двигателей типа АД мощностью 1600, 2500, 3150, 5000 кВт.

Катушки, у которых был определен размер $B_{\text{к}}$, были изготовлены с подпрессованной изоляцией для статорной обмотки опытного АД мощностью 3150 кВт. Шихтованный сердечник выполнен в размерах серийного АД мощностью 2500 кВт, но для катушек, состоящих из двух параллельных проводников, ширина проводника была увеличена на 0,5 мм.

При определении оптимального размера изоляции катушек были проведены следующие расчеты. Для каждой выборки определялись среднеарифметические значения $B_{\text{к}}$, дисперсия S^2 , среднеквадратическое отклонение σ , коэффициент вариации ϑ по формулам математической статистики:

$$\bar{B}_{\text{к}} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n h_m B_m; \quad (4.62)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^k (B_m B_{\text{к}})^2 h_m; \quad (4.63)$$

$$\vartheta = \frac{S}{B_{\text{к}}} 100, \quad (4.64)$$

где h_m — абсолютная частота m -го интервала; B_m — соответствующая середина интервала; k — число интервалов; n — число измерений (объем выборки).

В связи с тем, что распределение размеров катушек описывается нормальным законом, плотность распределения ширины катушек можно записать в следующем виде:

до подпрессовки

$$f(B_K) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2n}} e^{-\frac{(B_K - \mu)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{0,29\sqrt{2n}} e^{-\frac{(B_K - 18,5)^2}{2 \cdot 0,29^2}}, \quad (4.65)$$

где $\sigma = 0,31$ мм и $\mu = 18,5$ (параметры нормального распределения);
после подпрессовки с киперной лентой

$$f(B_K) = \frac{1}{0,17\sqrt{2n}} e^{-\frac{(B_K - 18)^2}{2 \cdot 0,17^2}}; \quad (4.66)$$

после подпрессовки без киперной ленты

$$f(B_K) = \frac{1}{0,11\sqrt{2n}} e^{-\frac{(B_K - 17,7)^2}{2 \cdot 0,11^2}}. \quad (4.67)$$

На рис. 4.132 приведены эмпирические распределения (гистограммы) и расчетные зависимости $f(B_K)$ катушек, которые показывают, что подпрессовка изо-

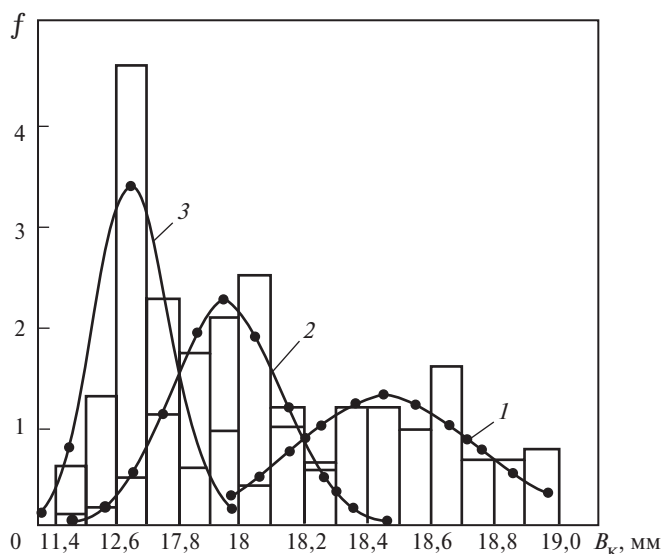


Рис. 4.132. Эмпирические распределения (гистограммы) и расчетные зависимости $f(B_K)$ размеров ширины катушки (с корпусной изоляцией) — 4АТД мощностью 3200 кВт:

1 — до подпрессовки; 2 — после подпрессовки с киперной лентой; 3 — после подпрессовки без киперной ленты

ляции без киперной ленты позволяет получить меньшее поле допусков ($\pm 0,3$ мм), чем при подпрессовках с киперной лентой (0,55 мм).

Меньшее поле допусков положительно сказывается на процессе укладки катушек в пазы сердечника. Укладка катушек в пазы размером $B_{\Pi} = 17,9$ мм, показала, что оптимальным размером B_k является $17,9 \pm 0,2$ мм. Катушки такими размерами укладываются в паз без особых усилий и в то же время занимают фиксированное положение в пазу. На рис. 4.133 приведено распределение размера h — расстояния (в радиальном направлении) от верхнего края зубца до катушки до и после пропитки, которое подтверждает фиксацию в пазах сердечника пазовых частей катушек с подпрессованной изоляцией, где h . Укладке катушек с положительным допуском по отношению к размеру паза в свету способствует технологическая стеклолаколента, которая после запекания превращается в прочную защитную коробку, защищающую изоляцию в пазовых частях от механических повреждений. При подпрессовках пазовых частей необходимо обеспечить плавный переход от подпрессованной изоляции к неподпрессованной, что достигается радиусом больше 10 мм у плит пресса, клина и планок; при меньших радиусах происходит механическое повреждение слюдяной бумаги.

Перераспределение толщины изоляции по периметру сечения при подпрессовках приведено на рис. 4.133, данные которого подтверждают увеличение толщины изоляции на узких сторонах сечения (по h), т.е. на наиболее электрически нагруженных участках обмотки.

Влияние подпрессовок на предполагаемые изменения структуры слюдяной бумаги и на изоляцию в целом оценивалось по пробивному напряжению непро-

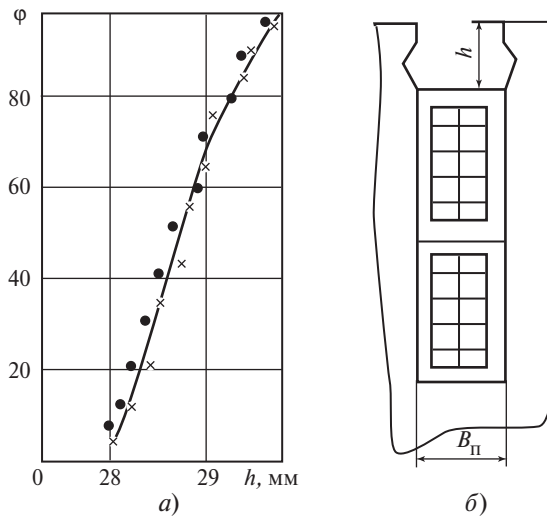


Рис. 4.133. Распределение значений h обмотки (а), выполненной подпрессованной изоляцией, и сечение паза статора (б):

● — до пропитки; × — после пропитки

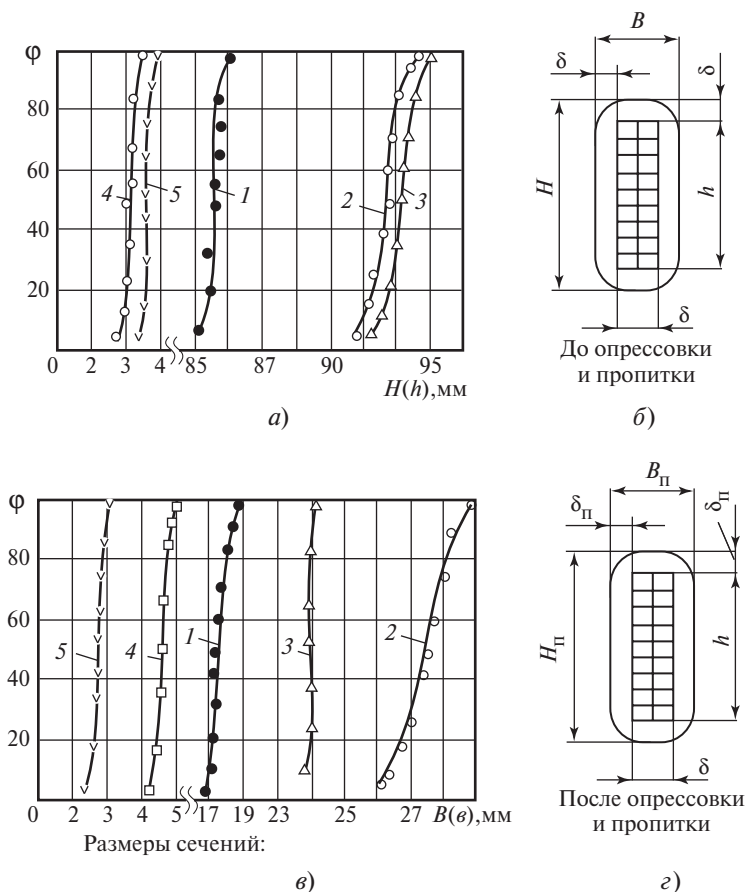


Рис. 4.134. Распределение значений размеров сечения (кривые 1, 2, 3) и толщины изоляции (кривые 4 и 5) пазовых частей по высоте и ширине катушек до опрессовки (а, б), после опрессовки (в, г)

питанной изоляции (рис. 4.134). Возможные механические нарушения слюдяной бумаги после пропитки не могут быть обнаружены из-за «залечивания» их компаундом. После испытаний сухой изоляции ее слои аккуратно разматывались и визуально оценивалось состояние слюдобумаги. Анализу подвергались участки пропитанной изоляции после испытаний ее на кратковременную или длительную электрическую прочность. Для послойного анализа пропитанной изоляции связующее (компаунд) выжигалось при температуре 450—500 °С и слои аккуратно разматывались. Такому анализу были подвергнуты несколько сотен коробок пропитанной и запеченной изоляции. Результаты визуального анализа слоев, испытанных на кратковременную и длительную электрическую прочность (рис. 4.135), свидетельствуют, что при подпрессовках до $K_{\text{п}} = 30\%$ не происходит нарушения структуры слюдяной бумаги — основного диэлектрического барьера. Это подтверждается тем, что изоляция 400 катушек, изготов-

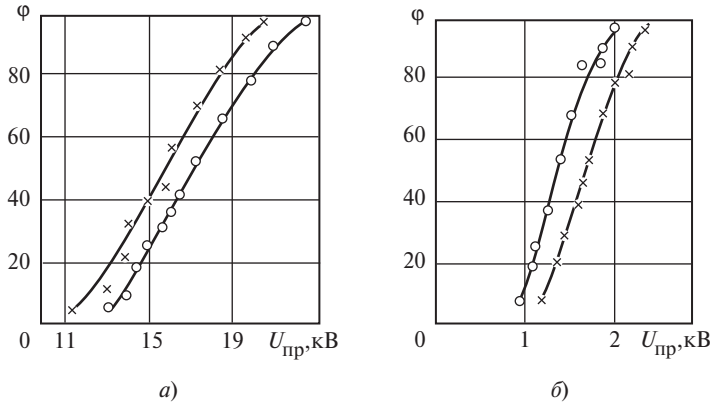


Рис. 4.135. Распределение значений пробивных напряжений непровитанной изоляции катушек (а) и одного слоя ленты ЛСКН-160ТТ (б):

× — изоляция не подпрессована; ○ — изоляция подпрессована до $K_n = 30\%$

ленных в производственных условиях для опытных АД, после подпрессовки выдержала испытания по принятым нормам для неопрессованной изоляции.

Качество пропиток подпрессованной изоляции «Монолит-4», оценивалось по электрическим и механическим свойствам готовой изоляции, по анализу слоев пропитанной изоляции. Пропитки изоляции проводились совместно с испытаниями серийных статоров АД по режимам изоляции «Монолит-2». Анализ показал качественную пропитку подпрессованной до $K_n = 30\%$ изоляции, что подтверждается ее электрическими и механическими свойствами.

4.4.2. Характеристика статорной обмотки с изоляцией «Монолит-4»

Кратковременная электрическая прочность изоляции исследовалась на стержнях — макетах, пазовых частях (ПЧ) натуральных стержней, катушках статорной обмотки, уложенных в пазы. Все электрические исследования проводились в трансформаторном масле. Пропитки подпрессованной изоляции проводились в лабораторных и производственных условиях совместно с серийными изделиями по режимам технологии «Монолит-2». При испытаниях ПЧ особое внимание уделялось месту перехода от опрессованной к изоляции неопрессованной, поэтому электрод накладывали с заходом на эти места. Изготовление и испытание статорной обмотки позволило получить информацию как по качеству изоляции, так и по влиянию на него процесса укладки катушек в шихтованный сердечник. Для изготовления опытных катушек применялись медные проводники, ширина которых была увеличена на 0,5 мм (катушки наматывались из двух параллельных проводников), что позволило одновременно уменьшить толщину изоляции за счет подпрессовки и сохранить внешние размеры пазовых

частей для укладки в серийно изготавливаемый сердечник. При толщине изоляции серийных катушек $\delta = 2,1$ мм на сторону у экспериментальных она составляла $\delta_{\text{п}} = 1,6$ мм (20 катушек, $K_{\text{п}} = 20\%$) и $\delta_{\text{п}} = 1,3$ мм (20 катушек, $K_{\text{п}} = 30\%$); у последних выполнены низкое (пазовое) и высокое (лобовое) сопротивления полупроводящие покрытия. Статорная обмотка, выполненная 60 катушками с тремя конструкциями изоляции (20 катушек с каждой, в том числе и с неподпрессованной), пропитана в производственных условиях. Результаты исследования кратковременной электрической прочности изоляции, подпрессованной до различных значений $K_{\text{п}}$, указывают на тенденцию к увеличению $E_{\text{пр}}$ с увеличением $K_{\text{п}}$ в заданных интервалах варьирования и на незначительное увеличение $U_{\text{пр}}$ при сохранении числа слоев изоляции ЛСКН-160ТТ (рис. 4.136). Анализ следов пробоев указывал, что в большинстве случаев они произошли на углах сечений в подпрессованной части изоляции. Ни одного пробоя не произошло в месте перехода от подпрессованной изоляции ПЧ к неподпрессованной, что предварительно указывало: это место не является электрически слабым.

В связи с тем что исследования длительной электрической прочности (так же как и кратковременной) носили сравнительный характер с неподпрессованной изоляцией, проведение их при одном напряжении могло дать объективную информацию для выбора оптимального значения $K_{\text{п}}$ и оптимальной толщины изоляции $\delta_{\text{п}}$. Срок службы катушек, уложенных в сердечник, при воздействующем напряжении 16 кВ определялся для подпрессованной изоляции. При этом после 2300 ч у изоляции, подпрессованной до $K_{\text{п}} = 20\%$ ($E_{\text{исп}} = 10$ кВ/мм), не произошло ни одного пробоя, и дальнейшие исследования были прекращены. Изоляция, подпрессованная до 30 % ($E_{\text{исп}} = 12$ кВ/мм), при этом

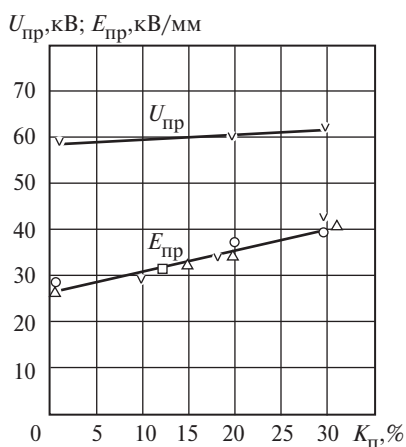


Рис. 4.136. Зависимость $U_{\text{пр}}$ и $E_{\text{пр}}$ от $K_{\text{п}}$

напряжении имеет среднее (50 %) время жизни 1400 ч (минимальное 740 ч и максимальное 2600 ч). Под воздействующим напряжением 23 кВ исследовалась и неподпрессованная изоляция. При этом изоляция с $K_{\text{п}} = 20\%$ испытывалась при $E_{\text{исп}} = 14$ кВ/мм; с $K_{\text{п}} = 30\%$ при $E_{\text{исп}} = 18$ кВ/мм и неподпрессованная — при $E_{\text{исп}} = 11$ кВ/мм. Результаты исследований приведены в табл. 4.48 и на рис. 4.137.

Результаты исследований показали, что несмотря на уменьшение толщины изоляции до 1,6 мм, т.е. примерно на 25 % по отношению к исходной (без подпрессовки), ее длительная электрическая прочность находится на более высоком уровне. Меньшее время жизни изоляции, подпрессованной до $K_{\text{п}} = 30\%$, дает

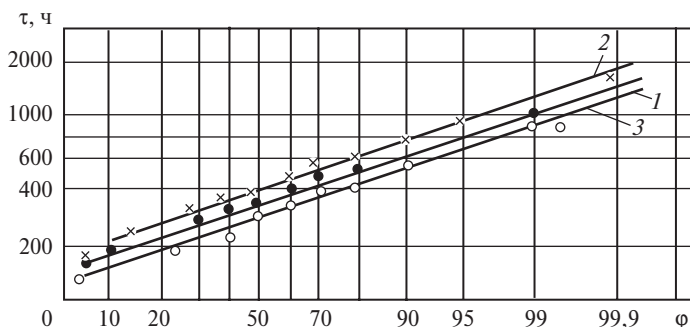


Рис. 4.137. Распределение времени жизни изоляции катушек натурной статорной обмотки:

1 — серийно изготавливаемая изоляция толщиной 2,1 мм, $U_{исп} = 23$ кВ, $E_{исп} = 11$ кВ/мм; 2 — уточненная изоляция толщиной 1,6 мм, $U_{исп} = 23$ кВ, $E_{исп} = 14$ кВ/мм, $K_{п} = 20$ %; 3 — уточненная изоляция толщиной 1,3 мм, $U_{исп} = 23$ кВ, $E_{исп} = 18$ кВ/мм, $K_{п} = 30$ %

Таблица 4.48

Результаты сравнительных испытаний катушек на длительную электрическую прочность при $U_{исп} = 23$ кВ

Время старения, ч	Напряженность		
	$E = 11$ кВ/мм	$E = 14$ кВ/мм	$E = 18$ кВ/мм
Минимальное	109	102	88
Среднее (50 %)	320	400	250
Максимальное	807	809	780

Примечания: 1. При $E = 11$ кВ/мм изоляция неподпрессованная, $\delta = 2,1$ мм.

2. При $E = 14$ кВ/мм изоляция подпрессованная, $K_{п} = 20$ %, $\delta_{п} = 1,6$ мм. 3. При $E = 18$ кВ/мм изоляция подпрессованная, $K_{п} = 30$ %, $\delta_{п} = 1,3$ мм.

основание сделать вывод, что $K_{п} = 20$ %, т.е. толщина подпрессованной изоляции 1,6 мм (на сторону) является оптимальной по сравнению с $\delta = 2,0 \div 2,2$ мм, из которой изготавливаются в настоящее время статорные обмотки АД.

При исследованиях изоляции ПЧ электрод накладывался с заходом на конусный переход от подпрессованной изоляции к неподпрессованной. При каждом значении напряженности исследовалось не менее 10 ПЧ с длиной электрода 1500 мм и $\delta_{п} = 2,6$ мм, подпрессованной на 20 % (табл. 4.49, рис. 4.138). Анализ следов пробоев показал, что в большинстве случаев они произошли на углах сечения ПЧ в подпрессованной части изоляции. Ни одного пробоя не произошло на переходе от подпрессованной изоляции к неподпрессованной, что окончательно подтвердило: место перехода не является электрически слабым.

Механические свойства подпрессованной изоляции определены на стержнях-макетах и изоляции, вырезанной из ПЧ стержней. Ухудшений механических свойств у подпрессованной изоляции по сравнению с исходной (неподпрессованной) не предполагалось, так как количество стеклоподложек, которыми они определяются, в изоляции не изменилось (рис. 4.139).

Таблица 4.49

**Результаты сравнительных испытаний пазовых частей стержней
на длительную электрическую прочность**

Время старения, ч	Напряженность $E_{\text{исп}}$, кВ/мм		
	10	12	15
Минимальное	366	157	90
Среднее (50 %)	600	400	145
Максимальное	1700	880	300

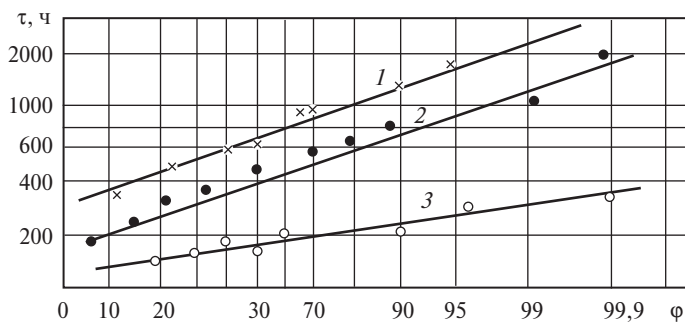


Рис. 4.138. Распределение времени жизни изоляции пазовых частей стержней турбогенератора (сечение 24×96 мм), подпрессовка до $K_{\text{п}} = 20\%$:

1 — до $E_{\text{исп}} = 10$ кВ/мм; 2 — до $E_{\text{исп}} = 12$ кВ/мм; 3 — до $E_{\text{исп}} = 15$ кВ/мм

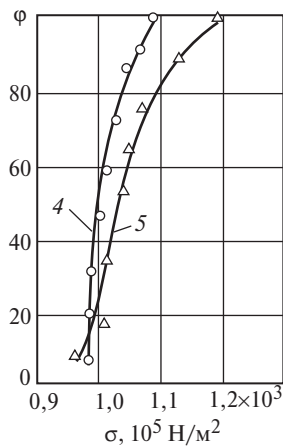
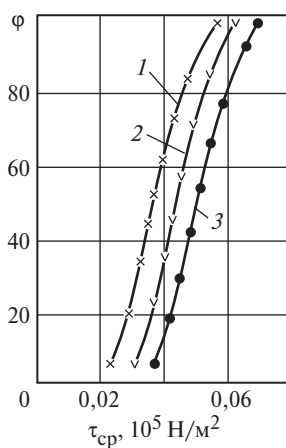


Рис. 4.139. Распределение значений удельных усилий сдвига изоляции по слоям $\tau_{\text{ср}}$ и разрывного усилия σ поперек намотки слоев:

1 — неподпрессованная изоляция; 2 — подпрессованная изоляция до $K_{\text{п}} = 20\%$; 3 — подпрессованная изоляция до $K_{\text{п}} = 30\%$; 4 — подпрессованная изоляция до $K_{\text{п}} = 20\%$; 5 — неподпрессованная изоляция

Результаты исследований показали, что статорные обмотки с подпрессованной на 20 % изоляцией (при сохранении числа слоев ЛСКН-160ТТ по электрическим и механическим характеристикам не уступают обмоткам, изготовляемым с изоляцией «Монолит-2».

4.4.3. Использование изоляции «Монолит-4» в конструкции статорной обмотки

При утонении изоляции от 2 мм, применяемой в настоящее время для статорных обмоток АД на напряжении 6 кВ, до 1,6 мм, т.е. примерно на 20 %, за счет подпрессовки до $K_{\text{п}} = 20$ % электрические и механические характеристики ее не только не ухудшаются, а становятся несколько выше.

Эффект от утонения изоляции, например, на 0,5 мм для статора АД рассмотрен в предварительных проработках новой серии АД4, разрабатываемой вместо серии АД2. Увеличение объема меди в неизменном по размерам пазе, допустимое увеличение мощности при равных средних перегревах, значения КПД приведены в табл. 4.50 для головных образцов АД. В целом за счет уменьшения толщины изоляции можно увеличить мощность двигателя примерно на 5 %.

При изготовлении подпрессованной изоляции поле допусков размера катушки по ширине уменьшается; коробка из технологической стеклолако-ленты позволяет укладывать катушку в паз с положительным допуском по отношению к ширине паза, что обеспечивает фиксацию ПЧ катушек в пазах (рис. 4.140). В процессе пропитки и запекания статора происходит подклейка катушек к стенкам пазов. Качество подклейки оценивали по усилиям выпрессовки ПЧ катушек из пазов. Перед выпрессовкой у катушек обрезают лобовые части, которые в реальных условиях также удерживают катушку в пазах. У части пазов удаляли и пазовые клинья. Усилия выпрессовки определены на катушках статорных обмоток в исходном состоянии, после длительного электрического старения (в трансформаторном масле в течение 800 ч), после ускоренных воздействий на статор основных эксплуатационных факторов, имитации 25 тыс. пусков со скоростью нагрева 4 °С/с и перегревом за пуск 55—60 °С. В каждом случае выпрессовывалось из пазов не менее 60 пазовых частей катушек.

Таблица 4.50

**Повышение мощности и КПД двигателей серии АД4
за счет увеличения объема меди в пазу**

Параметр	Значение				
Мощность АД, кВт	500	800	1600	2500	5000
Объем меди в пазу, %	13,0	8,5	8,5	8,5	6,3
Увеличение мощности, %	4,0	3,8	6,0	4,0	4,0
КПД, %	0,16	0,08	0,07	0,05	0,03

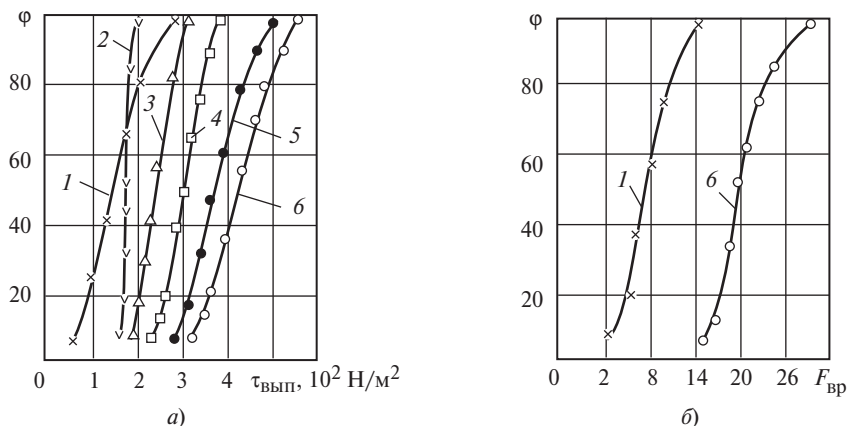


Рис. 4.140. Распределение значений удельных усилий (а) и силы выпрессовки (б) пазовых частей катушек из пазов сердечника:

Каташка с пазовым клином: 1 — исходное состояние; 2 — после циклических испытаний и длительного электрического старения обмотки. Без пазового клина: 3 — исходное состояние; 4 — после длительного электрического старения обмотки; 5 — после имитации 25 тыс. пусков; 6 — после циклических испытаний и длительного электрического старения

Результаты испытаний по выпрессовке приведены на рис. 4.140. Минимальное удельное усилие выпрессовки составляет в исходном состоянии обмотки $\tau_{\text{вып}} \geq 300 \text{ Н/м}^2$, после ускоренного воздействия основных эксплуатационных факторов $\tau_{\text{вып}} \geq 6 \text{ Н/м}^2$. При пересчете для обмотки, например, АТД2 мощностью 5000 кВт, высота катушки которой равна 3 см, усилия составляют: $300 \text{ Н/м}^2 \times 3 \text{ см} \times 2 = 180 \text{ кгс/см}$ длины и $6 \times 3 \times 2 = 360 \text{ Н/м}$ длины, где коэффициент 2 учитывает подклейку катушки к двум стенкам паза шихтованного сердечника.

Выполненные в НИИ «Сибэлектротяжмаш» расчеты электродинамических усилий, действующих на обмотки, показывают, что они существенно ниже усилий выпрессовки. Например, при пуске АТД2 мощностью 5000 кВт ($I_{\text{пуск}} = 6I_{\text{ном}} = 11 \text{ кА}$) это усилие составляет 10 Н/м длины.

Высокая механическая прочность всей конструкции статорной обмотки, как и качественная подклейка ее к стенкам пазов сердечника, ставят под вопрос целесообразность применения пазовых клиньев. Отказ от применения пазового клина толщиной 4 мм позволит при неизменном размере обмотки снизить наружный диаметр сердечника на 8 мм и уменьшить массу шихтованного сердечника на 2,0—3,5 %. Если увеличить на 4 мм высоту катушек, то это позволит увеличить мощность статора на 8 %. На опытных АД (мощностью 1600 кВт и 500 кВт) работоспособность статоров без пазовых клиньев проверялась на испытательном стенде в многократных пусковых режимах. После 3200 и 10 000 прямых пусков АД с маховыми массами не отмечено никаких изменений в закреплении ПЧ катушек в пазах без клиньев.

Запас по электрическим и механическим характеристикам изоляции после воздействия на нее основных эксплуатационных факторов позволяет заключить, что изоляция, выполненная на эпоксидном компаунде ПК-11, отвечает классу нагревостойкости выше, чем В. Эффект от перевода изоляции из класса нагревостойкости В в класс нагревостойкости F приведен в табл. 4.51. Результаты получены увеличением на 20 °С фактических перегревов АД, определенных типовыми испытаниями (допустимый перегрев обмотки статора класса В — 80 °С, класса F — 100 °С), т.е. примерно сохранены запасы по перегревам. В среднем эффект состоит в увеличении мощности АД на 13 %, т.е. в снижении показателя удельной массы в килограммах на киловатт также на 13 %.

Опытные АД мощностью 1600, 2500 и 3200 кВт с подпрессованной изоляцией, без пазовых клиньев испытывались на заводских стендах и в НИИ по классу нагревостойкости F, а мощностью 1600 кВт (три двигателя) эксплуатировались и наблюдались у потребителя. Никаких изменений в качестве крепления обмоток, а также изоляции не отмечено. Следовательно, за счет утонения изоляции, отказа от пазовых клиньев и перевода изоляции из класса В в класс F появляется возможность существенно повысить мощность двигателя.

Расчеты подтверждаются испытаниями натурных АД. Так, в размерах статора АД-2 мощностью 2500 кВт был изготовлен статор с предполагаемой (расчетной) мощностью 3150 кВт, т.е. предполагаемое увеличение мощности составило 28 % (650 кВт). Катушки изготовили с изоляцией «Монолит-4», статорную обмотку — без пазовых клиньев. Результаты испытаний двигателя показали, что, несмотря на повышенные электромагнитные нагрузки (линейная нагрузка увеличена на 13 %, индукция в зазоре на 15 %) позволили обеспечить нагрев статора в пределах допустимых по классу В температурах (максимальная — 115 °С, средняя — 105 °С) и увеличить гарантированный КПД на 0,2 %. При переводе обмотки в класс F, как показывают испытания, допустимая мощность по статору может быть увеличена до 3650 кВт.

Опыт изготовления, исследований и эксплуатации статоров с изоляцией «Монолит-4» статорных обмоток свидетельствует о возможности изготовления их вне корпуса двигателя. В серии двигателей АД4 предусматривалось, что как один из вариантов будет изготовлен двигатель без корпуса. Предполагалось за основу принять не корпус, а статор с двумя жесткими кольцами по торцам (рис. 4.141). В этом случае кольцам крепятся щиты АД и весь статор закрыва-

Таблица 4.51

Повышение мощности асинхронных двигателей

Параметр	Значение				
Мощность АД, кВт	500	800	1600	2500	5000
Фактический перегрев, °С	53	78	76	75	70
Увеличение мощности при перегреве (20 °С), %	19	13	12	13	13

Таблица 4.52

Технические данные асинхронных турбодвигателей на напряжение 6 кВ

Мощность, кВт	Тип двигателя, фирма, страна						
	АТД	АТД2	АТД4	Siemens, Германия	Zacsenwerk, Германия	AEG, Германия	Япония
500	$\frac{94,8}{8,40}$	$\frac{95,6}{4,30}$	$\frac{95,7}{3,86}$	$\frac{95,0}{4,60}$	$\frac{94,0}{4,20}$	$\frac{95,0}{4,90}$	—
630	$\frac{92,5}{7,10}$	$\frac{95,5}{5,00}$	$\frac{95,7}{4,22}$	—	$\frac{94,5}{3,84}$	$\frac{95,1}{4,21}$	—
800	$\frac{95,5}{6,10}$	$\frac{95,8}{4,30}$	$\frac{96,0}{3,53}$	—	$\frac{95,0}{3,68}$	$\frac{95,9}{3,66}$	—
1000	$\frac{94,6}{7,20}$	$\frac{95,8}{5,00}$	$\frac{96,1}{3,03}$	$\frac{95,9}{3,80}$	$\frac{95,5}{3,40}$	$\frac{96,2}{3,20}$	—
1250	$\frac{95,1}{6,20}$	$\frac{96,3}{4,40}$	$\frac{96,4}{3,17}$	$\frac{96,2}{4,15}$	$\frac{95,7}{3,36}$	$\frac{96,3}{3,14}$	—
1600	$\frac{95,6}{5,30}$	$\frac{96,5}{3,70}$	$\frac{96,6}{2,67}$	$\frac{96,4}{3,32}$	$\frac{96,0}{2,94}$	$\frac{96,3}{2,70}$	—
2000	$\frac{95,8}{4,90}$	$\frac{96,5}{4,00}$	$\frac{96,7}{2,78}$	$\frac{96,6}{3,30}$	$\frac{96,2}{2,95}$	—	—
2500	$\frac{96,4}{4,30}$	$\frac{96,9}{3,60}$	$\frac{97,0}{2,46}$	$\frac{96,7}{2,95}$	$\frac{96,5}{2,64}$	—	—
3150	$\frac{95,3}{5,10}$	$\frac{96,8}{3,80}$	$\frac{97,2}{2,23}$	$\frac{96,9}{2,76}$	—	—	—
4000	$\frac{96,2}{4,40}$	$\frac{96,9}{3,30}$	$\frac{97,3}{2,52}$	—	—	—	$\frac{96,2}{2,60}$
5000	$\frac{96,5}{3,70}$	$\frac{97,4}{2,90}$	$\frac{97,5}{2,20}$	$\frac{97,2}{2,21}$	—	—	$\frac{96,3}{2,38}$
6300	—	—	$\frac{97,6}{1,95}$	—	—	—	$\frac{96,4}{2,10}$
8000	$\frac{96,7}{2,65}$ *	$\frac{97,0}{2,18}$ *	$\frac{97,6}{1,75}$	—	—	—	$\frac{96,5}{2,01}$

* Двигатели с водяным охлаждением ротора и статора.

Примечание. В числителе — коэффициент полезного действия, %; в знаменателе — удельная масса, кг/кВт.

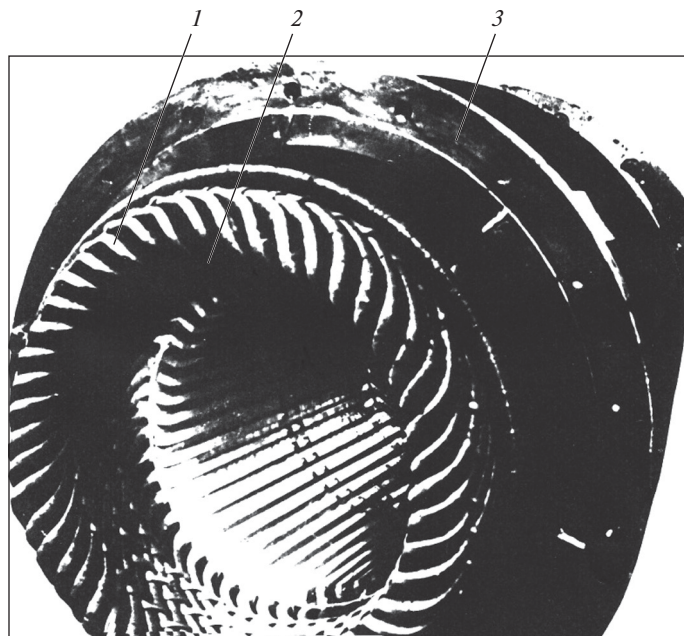


Рис. 4.141. Конструкция статора АД4 (АД мощностью 3150 кВт) бескорпусного исполнения:

1 — статорная обмотка с утоненной изоляцией без крепления пазовыми клиньями; 2 — шихтованный сердечник; 3 — кольца для крепления щитов двигателя

ется тонкостенным кожухом. Переход на такую конструкцию позволит, по ориентировочным расчетам, уменьшить массу двигателя примерно на 15 %. Работоспособность конструкции проверялась на опытных двигателях мощностью 1600, 2500, 3150 и 5000 кВт.

Таким образом, исследованные и предложенные усовершенствования в конструкции статора: отказ от пазовых клиньев, использование склеенного сердечника статора — открывают дальнейшие перспективы в создании высокоэффективных электродвигателей высокого напряжения.

В табл. 4.52 приведены сравнительные характеристики асинхронных турбодвигателей серии АД и ведущих фирм ФРГ и Японии.

Глава пятая

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СВОЙСТВА ИЗОЛЯЦИИ «МОНОЛИТ-5»

До настоящего времени в эксплуатации находится большое количество гидро- и турбогенераторов, имеющих микалентную компаундированную изоляцию. Опыт эксплуатации генераторов показал, что основное количество отказов определяется повреждением статорных обмоток. Наибольшее количество отказов в работе из-за пробоя корпусной изоляции наблюдалось у статорных обмоток гидрогенераторов на номинальное напряжение 13,8 и 15,75 кВ. Детальный анализ причин пробоя корпусной изоляции статорных обмоток этих генераторов, проведенный на большом количестве машин, показал, что определяющей и наиболее существенной причиной является ионизационное старение витковой изоляции элементарных проводников стержней.

В процессе эксплуатации из-за воздействия повышенной температуры и термомеханических нагрузок происходит вспухание и отслаивание корпусной изоляции от стержня. В газовых полостях, которые образуются между стержнем и внутренним слоем корпусной изоляции, возникают разряды, приводящие с течением времени эксплуатации к полному ионизационному старению витковой изоляции элементарных проводников. Разрушение изоляции проводников, а также связующего между ними, вызывает потерю монолитности токоведущей части стержня, повышенную вибрацию отдельных проводников, перетирание изоляции между проводниками и, как следствие, замыкание элементарных проводников; из-за замыкания последних происходит местный перегрев изоляции, что приводит к пробоя корпусной изоляции стержня. Было замечено, что в ряде случаев подобные повреждения сопровождались выгоранием стали в местах пробоя, что требовало длительного и дорогостоящего ремонта. Опыт эксплуатации показал также, что корпусная микалентная компаундированная изоляция и ее главная составная часть — щепаная слюда после длительной (15 лет и более) эксплуатации находятся в удовлетворительном состоянии.

Для устранения повышенной аварийности ряда гидрогенераторов на номинальное напряжение 13,8 и 15,75 кВ необходима полная перемотка обмоток на стержни с новой изоляцией, что сопряжено с большими затратами материальных (проводник, корпусная изоляция) и людских ресурсов. Анализ состояния изоляции стержней генераторов и учет технико-экономических требований сделал необходимым решение задачи по восстановлению микалентной изоляции стержней. Следовало также разработать метод, позволяющий получить высокие характеристики изоляции элементарных проводников, сцементировать эти проводники, придать стержню монолитность и жесткость, а также заменить битумное связующее в изоляции термореактивным полимерным материалом на стержнях, извлеченных из статора при перемотке генератора.

Для этого была разработана технология восстановления микалентной изоляции стержней гидрогенераторов и проведены исследования свойств полученной изоляции. Изоляция восстанавливается на стержнях, пришедших в аварийное состояние генераторов и извлеченных из генератора во время капитального ремонта. Для перемотки обмоток отпадает необходимость в изготовлении новых комплектов обмоток, полностью используются медные стержни и корпусная изоляция в виде слюды, необходим только эпоксидный компаунд для замены битумного связующего в изоляции. Разработанная технология позволяет получать высококачественную термореактивную слюдоэпоксидную изоляцию «Монолит-5».

Технология изготовления изоляции «Монолит-5» заключается в следующем:

- извлеченные из статора генератора стержни испытывают испытательным напряжением;
- поверх изоляции наносят стеклоленту в полнахлеста;
- изолированные стержни помещают в обогреваемую вакуум-плотную коробку;
- производят термообработку изоляции стержней при температуре 350—400 °С в течение 10—12 ч при одновременном вакуумировании;
- откачку воздуха проводят через рессивер, наполненный трансформаторным маслом, для предотвращения попадания битума в вакуумный насос.

За время термообработки битумное связующее практически полностью удаляется из изоляции стержней.

Практика извлечения стержней с микалентной изоляцией после длительной эксплуатации показала, что часть изоляции стержней (до 20 %) всей обмотки при демонтаже повреждается и не может быть восстановлена. В этом случае поврежденную часть изоляции срезают, устанавливают при необходимости изоляционные прокладки между элементарными проводниками и на место снятой изоляции наносят сухую слюдосодержащую ленту ЛСКН-160ТТ. Затем уже поверх всей изоляции наносится стеклолента.

Последующая проработка технологии пропитки изоляции стержней показала, что корпусная и витковая изоляции стержней содержат воздушные полости значительных размеров, в которых находятся шлакообразные остатки деструкции битумного связующего. Поэтому при последующей пропитке и запекании пропитывающий компаунд вытекает из этих полостей, что существенно снижает электрофизические и механические характеристики изоляции. Кроме того, технологический цикл отверждения компаунда очень длителен (25—30 ч). Для устранения этих неудобств обмотку пропитывают раствором ускорителя реакции отверждения пропиточного компаунда, адсорбирующимися алифатическими и ароматическими группами в продуктах разложения битума. Таким образом обеспечивается равномерное после удаления растворителя распределение ускорителя по всему объему витковой и корпусной изоляции стержня и воздушных полостей.

Это обеспечивает одновременное и полное отверждение пропиточного компаунда, что исключает возникновение дополнительных структурных напряжений, которые снижают механическую прочность элементов обмотки. Использо-

вание для консолидации плетеного стержня и корпусной изоляции одного и того же термореактивного компаунда и одновременное его отверждение по всему объему стержня исключают возникновение структурных напряжений на границе плетеной стержень — корпусная изоляция, которые обычно имеют место из-за различных по природе компаундов, склеивающих стержень и пропитывающих корпусную изоляцию. Одновременная и полная монолитность обмотки, пропитанной одним компаундом, обеспечивает значительное увеличение механической прочности и улучшение электромеханических свойств изоляции обмотки.

Одновременно исключается вытекание компаунда и сокращается срок отверждения в 4—5 раз. Введенный ускоритель сокращает время отверждения только того компаунда, который пропитал изоляцию обмотки, и не влияет на срок жизни остальной части компаунда, необходимого для заполнения пропиточной емкости. Подготовленные таким образом стержни помещают в кассету пресс-планок, обеспечивающих требуемые геометрические размеры стержня и изоляции. Кассету со стержнями помещают в пропитывающую емкость, где проводят пропитку под вакуумом 4—5 ч, а затем под давлением $(8\div 10)10^4$ Па пропиточным компаундом ПК-11 при температуре 60 ± 5 °С в течение 1,5—2,0 ч. Далее компаунд сливают, и кассета с пропитанными стержнями помещается в термостат, где при температуре 150 ± 5 °С в течение 6—8 ч производится дополнительная термообработка для отверждения компаунда. Охлажденную кассету разбирают и готовые стержни передаются на испытания.

Разработка технологии восстановления микалентной изоляции и создание необходимого для этого оборудования проводились для гидрогенераторов типа СВ-2-1500/200-88 мощностью 113 МВт на номинальное напряжение 15,75 кВ, эксплуатируемых более 15 лет. Проведенные работы позволили разработать типовой процесс изготовления изоляции «Монолит-5» для любых типов гидрогенераторов. Все исследования свойств изоляции «Монолит-5» проводились на стержнях гидрогенератора типа СВ-2-1500/200-88. В табл. 5.1 приведены основные характеристики изоляции «Монолит-5», микалентной компаундированной изоляции и изоляции «Монолит-2», широко применяемой для генераторов. Эти данные показывают, что изоляция «Монолит-5» обладает более высокими характеристиками по сравнению с микалентной компаундированной изоляцией и имеет те же параметры, что и изоляция «Монолит-2».

Проверка изоляционных свойств элементарных проводников стержней, извлеченных из генераторов для восстановления изоляции, показала, что сопротивление изоляции между элементарными проводниками составляет 80—10 МОм, пробивное напряжение изменяется от 120 В до 1,6 кВ. На рис. 5.1 и 5.2 приведены построенные по 150 экспериментальным значениям кривые распределения и пробивного напряжения изоляции между смежными парами элементарных проводников. На рис. 5.1 даны значения сопротивления изоляции, отнесенные к 1 м длины проводника. Приведенные данные показывают, что пробивное напря-

Таблица 5.1

Основные электрофизические характеристики изоляции

Характеристика	Тип изоляции		
	«Монолит-5»	Микалентная компаундиро- ванная	«Монолит-2»
Электрическая прочность, кВ/мм:			
при 20 °С	34—40	17	35
при 130 °С	33—38	—	32
Тангенс угла диэлектрических потерь при 20 °С:			
$U_{\text{исп}} = 3 \text{ кВ}$	0,04	0,06	0,01
$U_{\text{исп}} = 21 \text{ кВ}$	0,07	—	—
То же при 130 °С:			
$U_{\text{исп}} = 3 \text{ кВ}$	0,06	0,35	0,05
$U_{\text{исп}} = 9 \text{ кВ}$	0,08	—	—
Усилие критического прогиба стержня, Н, при 20 °С	18 000	6000	17 600
Напряжение сдвига изоляции, Н/м ² :			
при 20 °С	$4,5 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^6$
при 105 °С	—	$2 \cdot 10^5$	—
при 130 °С	$2,8 \cdot 10^6$	—	$3,5 \cdot 10^6$
Модуль упругости, Н/м ² :			
при 20 °С	$1 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^9$	$3,5 \cdot 10^{10}$
при 130 °С	$3 \cdot 10^9$	—	$5 \cdot 10^4$
Предел прочности при растяжении, Н/м ² :			
при 20 °С	$6,2 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^7$	$9,0 \cdot 10^7$
при 105 °С	—	$1,0 \cdot 10^7$	—
при 130 °С	$2,9 \cdot 10^7$	—	$5,0 \cdot 10^7$
Электрическая прочность изоляции элементарных проводников, кВ/мм, при 20 °С	2,4—6,7	0,12—1,6	—
Длительно допустимая рабочая температура, °С	130	105	130

жение между элементарными проводниками стержня после восстановления их изоляции по технологии «Монолит» составляет 2,4—6,7 кВ, т.е. превышает аналогичные характеристики для стержней с новой микалентной компаундированной изоляцией. Сопротивление изоляции элементарных проводников после ее восстановления находится в пределах 10^8 — 10^{10} Ом.

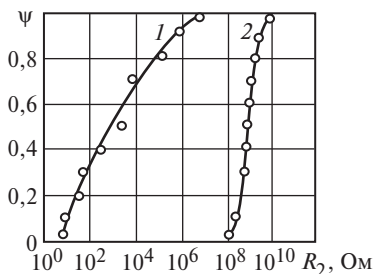


Рис. 5.1. Сопротивление изоляции между парами элементарных проводников стержней гидрогенераторов:

1 — до восстановления изоляции; 2 — после восстановления изоляции «Монолит-5»

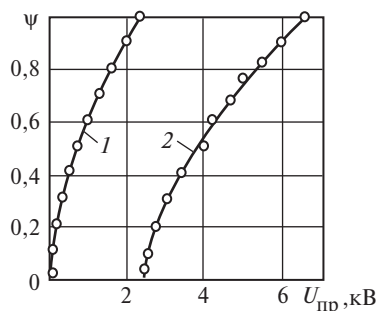


Рис. 5.2. Кривые распределения значений пробивного напряжения между парами элементарных проводников стержней гидрогенераторов:

1 — до восстановления изоляции; 2 — после восстановления изоляции «Монолит-5»

Новая технология дала возможность не только значительно повысить уровни электрических характеристик изоляции элементарных проводников, доведя их до уровней характеристик стержней с термореактивными видами изоляции, но и сementировать элементарные проводники, исключив их взаимное перемещение и вибрацию, и придать стержню в целом жесткость, превышающую жесткость стержня с микалентной компаундированной изоляцией в 6—10 раз в исходном состоянии и в 20—30 раз при температурах 105—120 °С. Жесткость стержня с изоляцией «Монолит-5» практически соответствует жесткости стержня с термореактивной изоляцией «Монолит-2». На рис. 5.3 приведены значения кратковременной электрической прочности изоляции стержней, извлеченных из генератора после эксплуатации, и изоляции «Монолит-5», причем кривые 1 и 3 построены соответственно по 36 и 50 экспериментальным значениям электрической прочности изоляции стержней одной партии, извлеченных из одного генератора, до (кривая 1) и после (кривая 3) восстановления изоляции.

На рис. 5.4 приведены значения длительной электрической прочности новой микалентной компаундированной изоляции и изоляции «Монолит-5», определенные при непрерывном воздействии электрического поля напряженностью 8 и 10 кВ/мм. Длительная электрическая прочность микалентной изоляции определялась на макетах с толщиной изоляции 3 мм на сторону, а изоляции «Монолит-5» — на отрезках пазовой части стержней генератора с толщиной изоляции 4 мм.

Приведенные на рис. 5.3 и 5.4 значения показывают, что по основным электрическим характеристикам кратковременной и длительной электрической прочности изоляция «Монолит-5» превосходит микалентную компаундированную изоляцию. Изоляция «Монолит-5» имеет более высокие значения длительной электрической прочности по сравнению с современными видами термореактивной изоляции.

→

Рис. 5.3. Кривые распределения электрической прочности корпусной изоляции стержней гидрогенераторов:

1 — микалентная компаундированная изоляция после эксплуатации в течение 15 лет; 2 — новая микалентная компаундированная изоляция; 3 — «Монолит-5»

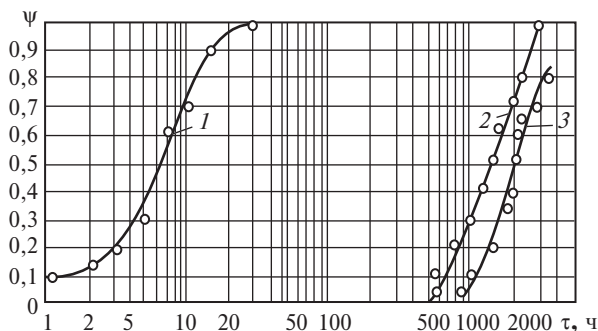
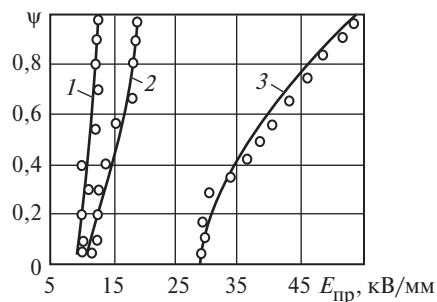


Рис. 5.4. Кривые распределения значений времени жизни микалентной компаундированной изоляции (кривая 1) и изоляции «Монолит-5» (кривые 2 и 3):

1 и 3 — при напряженности электрического поля 8 кВ/мм; 2 — при напряженности электрического поля 10 кВ/мм

Это можно объяснить тем, что изоляция «Монолит-5» в качестве основного диэлектрического барьера содержит щепаную слюду мусковит, а не слюдинитовую бумагу. Во время старения при напряженности поля 10 кВ/мм определялся уровень амплитуды частичных разрядов в изоляции. Опыты доказали, что после 1,5 тыс.ч старения уровень амплитуды частичных разрядов имел такое же значение, как в исходном состоянии, что свидетельствует об отсутствии ионизационного разрушения изоляции при этих испытаниях.

На рис. 5.5, а, б приведены зависимости удельного объемного сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь изоляции «Монолит-5» от температуры. Образец изоляции был срезан со стержня толщиной 4 мм. Измерения показали, что при температуре от 20 до 180 °С произошло снижение сопротивления изоляции от $8 \cdot 10^{15}$ до $4 \cdot 10^{13}$ Ом/см, т.е. изоляция «Монолит-5» имеет высокое значение сопротивления при повышенных температурах. Тангенс угла диэлектрических потерь при измерении при температуре от 20 до 120 °С изменялся незначительно и лежал в пределах 0,04—0,06. При повышении температуры до 180 °С он возрастал до 0,12, т.е. изоляция «Монолит-5» имеет значи-

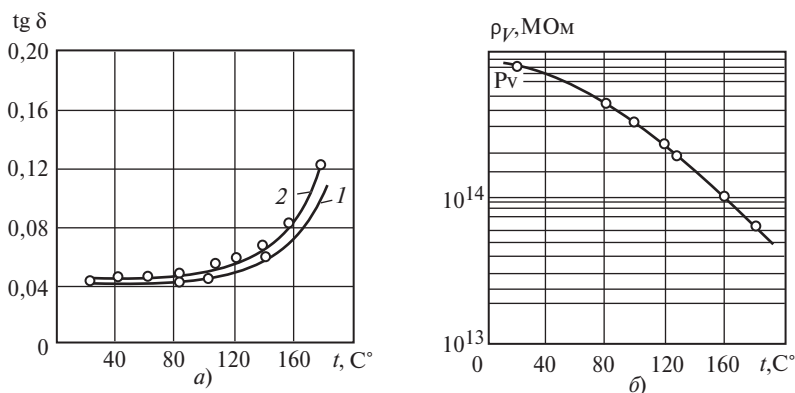


Рис. 5.5. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь и удельного объемного сопротивления изоляции «Монолит-5» от температуры:

1 — при напряжении 3 кВ; 2 — при напряжении 9 кВ

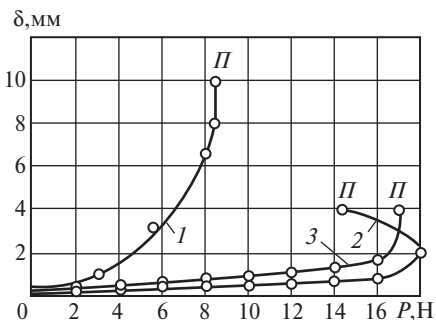


Рис. 5.6. Зависимость прогиба стержней гидрогенераторов от изгибающего усилия:

1 — микалентная компаундированная изоляция; 2 — «Монолит-2»; 3 — «Монолит-5»; П — пробой изоляции

тельно меньшие диэлектрические потери по сравнению с микалентной компаундированной изоляцией.

Изоляция «Монолит-5» в отличие от других типов изоляции не содержит подложек в виде стеклоткани или бумаги, а состоит из щепаной слюды и эпоксидного компаунда. Поэтому при разработке системы изоляции «Монолит-5» особое внимание было уделено исследованию ее механических характеристик и способам закрепления стержней в пазах генераторов, практически полностью исключающих вибрации стержней. Доказано, что терморезистивная стеклослюдинитовая изоляция обладает меньшей эластичностью, особенно при повышенных температурах, по сравнению с микалентной компаундированной изоляцией из-за большей жесткости стержней с терморезистивной изоляцией. Поэтому требуются значительные усилия для ее механического разрушения. На рис. 5.6 приведены зависимости размера прогиба от изгибающего усилия для стержней гидрогенераторов с микалентной компаундированной изоляцией, изоляцией «Монолит-2» и «Монолит-5».

Данные, приведенные на рис. 5.6 и в табл. 5.1, показывают, что изоляция «Монолит-5» более эластична по сравнению с изоляцией «Монолит-2». Стержни гидрогенератора с изоляцией «Монолит-5» обладают большей жесткостью по сравнению со стержнями с микалентной компаундированной изоляцией. Механические усилия, которые могут привести к излому микалентной компаундированной изоляции, практически безвредны для стержней с изоляцией «Монолит-5».

Однако, несмотря на большую эластичность изоляции «Монолит-5» по сравнению с изоляцией «Монолит-2», при укладке в статор стержни с изоляцией «Монолит-5», так же как стержни с другими типами терморепактивной изоляции, не должны подвергаться существенным механическим деформациям. Это положение, общее для всех типов терморепактивной изоляции, было учтено при проектировании оборудования для изготовления изоляции «Монолит-5».

Температурные зависимости напряжения сдвига изоляции относительно медного стержня для микалентной изоляции «Монолит-2» и изоляции «Монолит-5» показывают, что в процессе изготовления изоляции «Монолит-5» происходит хорошая цементация корпусной изоляции и изоляции элементарных проводников стержня. Результаты исследования электрофизических характеристик показывают, что изоляция «Монолит-5» по основным свойствам значительно превосходит микалентную компаундированную изоляцию, находится на уровне современных видов терморепактивной изоляции, а по длительной электрической прочности превосходит терморепактивную изоляцию. Эти данные позволяют сделать вывод, что переработка микалентной компаундированной изоляции в терморепактивную слюдоэпоксидную «Монолит-5» дает возможность обеспечить такую же надежность и долговечность статорной обмотки гидрогенератора, как и при полной перемотке обмотки на стержне с новой терморепактивной изоляцией.

Изоляция «Монолит-5» допускает длительную эксплуатацию при температуре 130 °С, обладает более высокой теплопроводностью, а за счет устранения пустот изоляции и в пазу — более высокой теплопередачей по сравнению с микалентной компаундированной изоляцией. Применение изоляции «Монолит-5» в гидрогенераторах позволит значительно повысить надежность и долговечность обмотки статора, а также при необходимости даст возможность на 10—15 % увеличить мощность генераторов за счет более высоких электрофизических характеристик изоляции.

Глава шестая

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ «МОНОЛИТ-2» В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

В течение длительного времени для тяговых электрических машин, как известно, применялась изоляция класса нагревостойкости В из микаленты на термопластичных (главным образом масляно-битумных) или терморезистивных органических связующих. Затем для машин с повышенной удельной мощностью была применена изоляция класса нагревостойкости Н из стекломикаленты на кремнийорганических лаках.

Специфически сложные условия эксплуатации, значительно возросшие в последнее десятилетие, весовые нагрузки и скорости вождения поездов привели к необходимости разработки высокоэкономичных и надежных машин. Повышение удельной мощности и снижение расходов на обслуживание путем значительного повышения эксплуатационной надежности — два важнейших требования, которые определяют в настоящее время развитие современных конструкций тяговых машин.

При проектировании тяговых машин одной из наиболее трудных задач является получение высоконадежной машины максимальной мощности в заданных габаритных размерах. Эта задача может решаться применением изоляции повышенной нагревостойкости, допускающей рабочую температуру 180 °С и выше, либо изоляции повышенной теплопроводности и монолитности, а также разработкой технологических процессов изготовления якорей и катушек, обеспечивающих высокую теплопередачу от проводника обмотки к корпусу двигателя. Если эти способы изготовления электродвигателей позволяют получить мощность одного и того же порядка, то при прочих равных условиях следует отдать предпочтение второму, так как в этом случае машина будет меньше нагреваться, что положительно скажется на ее эксплуатационной надежности (в первую очередь коллектора и подшипников). При выборе оптимальной изоляции для тяговых машин следует принимать во внимание не только ее нагревостойкость, но и такие важнейшие показатели для надежной эксплуатации этих машин, как высокая электрическая и механическая прочность, влагостойкость, виброустойчивость, а также способность сохранять эти характеристики при длительной эксплуатации.

В последние годы для изолирования якорей и полюсов тяговых электрических машин все более широкое применение находят стеклослюдинитовые материалы и эпоксидные смолы. Разработанная терморезистивная стеклослюдинитовая изоляция «Монолит-2» для тягового электромашиностроения позволила значительно снизить перегревы обмоток и повысить эксплуатационную надежность машин (см. гл. 4).

Технология изготовления изоляции «Монолит-2» отличается высокой надежностью и экономичностью. Основные процессы изготовления изоляции могут быть механизированы, а процессы пропитки и запекания автоматизированы.

Определение характеристик изоляции «Монолит-2» проводилось на макетах якорной обмотки, полюсных моноблоках электродвигателей типов НБ-418к и ДК-259 и якорях электродвигателей типа НБ-418к. На рис. 6.1 приведено распределение значений пробивного напряжения изоляции толщиной 1 мм макетов якорной обмотки.

Электрическая прочность изоляции «Монолит-2» составляет 27—37 кВ/мм при температуре 20 °С и 26—34 кВ/мм при температуре 155 °С. После выдержки в течение 10 сут в воде электрическая прочность ее находится в пределах 22—35 кВ/мм, а в среде с относительной влажностью $97 \pm 3\%$ — 24—33 кВ/мм. Пробивное напряжение витковой изоляции при двусторонней толщине 0,4 мм составляет 9,5—18,5 кВ. Результаты этих испытаний показывают, что изоляция «Монолит-2» имеет электрическую прочность витковой изоляции в 3—4 раза, а корпусной изоляции в 2,0—2,5 раза большую, чем у серийной микалентной изоляции. Электрическая прочность изоляции «Монолит-2» незначительно снижается после выдержки макетов в течение 10 сут в воде или среде с относительной влажностью $97 \pm 3\%$.

Применение вакуум-нагнетательной пропитки эпоксидным компаундом по технологии «Монолит-2» позволяет значительно увеличить электрическую прочность и надежность витковой изоляции якорных катушек. На рис. 6.2 и 6.3 приведены результаты определения пробивного напряжения макетов секций

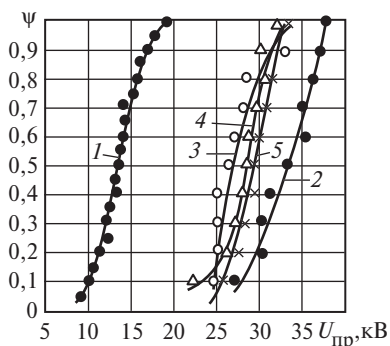


Рис. 6.1. Распределение значений пробивного напряжения витковой (кривая 1) и корпусной (кривые 2—5) изоляции «Монолит-2»:

1, 2 — изоляция в исходном состоянии; 3 — после выдержки в течение 10 сут в среде с относительной влажностью $97 \pm 3\%$; 4 — после выдержки в течение 10 сут в воде; 5 — после 10 циклов старения при температуре 200 °С и выдержке в течение 10 сут в среде с относительной влажностью $97 \pm 3\%$

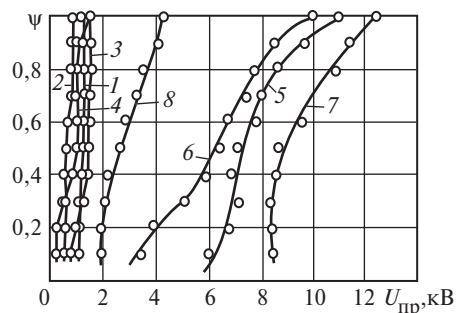


Рис. 6.2. Распределение значений пробивного напряжения макетов из провода марки ПСД:

1—4 — провода не пропитаны; 5—8 — пропитаны эпоксидным компаундом; 1 и 5 — провода в исходном состоянии; 2, 6 — при температуре 150 °С; 3, 7 — после 5 сут в среде с относительной влажностью $97 \pm 3\%$; 4, 8 — после 10 сут при температуре 220 °С

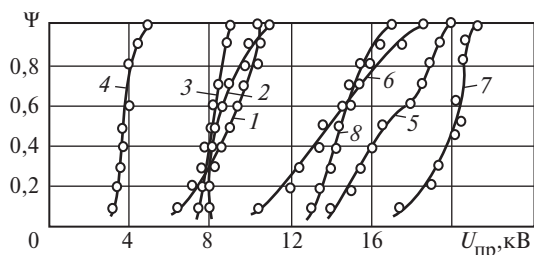


Рис. 6.3. Распределение значений пробивного напряжения макетов из провода марки ПТВСД:

1—4 — провода не пропитаны; 5—8 — пропитаны эпоксидным компаундом; 1, 4 — провода в исходном состоянии; 2, 6 — при температуре 150 °С; 3, 7 — после 5 сут в среде с относительной влажностью $97 \pm 3 \%$; 4, 8 — после 10 сут при температуре 220 °С

якорной обмотки, выполненных из провода марок ПСД и ПЭТВСД без дополнительной витковой изоляции.

Значения пробивного напряжения определялись между двумя проводниками макетов, которые не подвергались пропитке, и пропитанных эпоксидным компаундом. Пробивное напряжение между двумя проводами марки ПСД до пропитки составляло 0,8—1,5 кВ, а после пропитки эпоксидным компаундом — 6—11 кВ. Пробивное напряжение между двумя проводами марки ПЭТВСД составляло до пропитки 7,5—11,5 кВ и после нее — 15—21 кВ. Макеты с витковой изоляцией, пропитанной эпоксидным компаундом, имеют более высокие значения пробивного напряжения при температуре 150 °С, после старения в течение 10 сут при температуре 220 °С и после выдержки в камере с относительной влажностью $97 \pm 3 \%$. Повышение значения пробивного напряжения макетов после выдержки в среде с относительной влажностью $97 \pm 3 \%$ по сравнению с исходным состоянием произошло вследствие выравнивания электрического поля за счет увлажнения поверхности изоляции.

Применение пропитки якорей эпоксидным компаундом одновременно с увеличением электрической прочности витковой изоляции позволяет сцементировать проводники обмотки, исключить их перемещение и вибрацию, а также увеличить теплопроводность и теплопередачу изоляции. Следует отметить высокую эффективность провода марки ПЭТВСД для якорных обмоток при пропитке по технологии «Монолит-2», так как при этом исключается процесс нанесения витковой изоляции на отдельные проводники катушек, а повышенные значения пробивного напряжения провода марки ПЭТВСД позволяют испытывать изоляцию до пропитки достаточно высоким напряжением.

На рис. 6.4 приведены результаты определения сопротивления изоляции макетов в зависимости от температуры. Изоляция «Монолит-2» имеет высокое сопротивление как при комнатной, так и при повышенной температуре. При температуре 155—180 °С сопротивление изоляции составляет $(6 \div 9)10^{10}$ Ом.

На рис. 6.5 приведены зависимости сопротивления изоляции макетов от времени выдержки в воде и среде с относительной влажностью $97 \pm 3 \%$. Изоляция «Монолит-2» обладает высокой водостойкостью; сопротивление изоляции

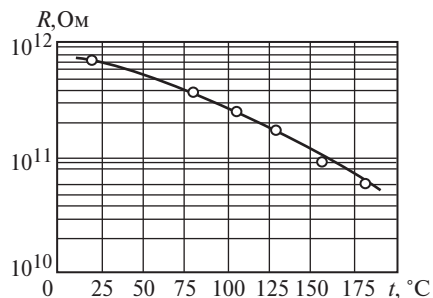


Рис. 6.4. Зависимость сопротивления изоляции «Монолит-2» от температуры

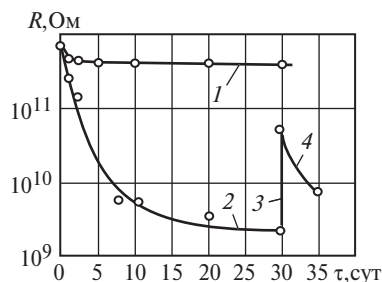


Рис. 6.5. Зависимость сопротивления изоляции «Монолит-2» от времени выдержки в воде (кривая 1) и среде с относительной влажностью $97 \pm 3 \%$ (кривые 2 и 4):

1 — исходное положение; 2 — выдержка в течение 30 сут в гигростате; 3 — выдержка на воздухе в течение 1 ч; 4 — выдержка в течение 5 сут в гигростате

после 30 сут выдержки в воде составляет $4 \cdot 10^{11}$ Ом. Сопротивление изоляции образцов, помещенных в гигростат при относительной влажности $97 \pm 3 \%$, снизилось. После 30 сут выдержки во влажной среде оно уменьшилось до $2 \cdot 10^9$ Ом, что обусловлено конденсацией влаги на выводных концах макетов. После извлечения макетов из гигростата и выдержки их при комнатных условиях в течение 1 ч сопротивление изоляции макетов увеличилось до $5 \cdot 10^{10}$ Ом.

Были также проведены циклические испытания макетов якорной обмотки с изоляцией «Монолит-2». Каждый цикл состоял из теплового старения при температуре 200 °C в течение 7 сут, выдержке в камере при температуре 50—60 °C в течение 7 ч, выдержки в среде с относительной влажностью $97 \pm 3 \%$ в течение 3 сут и испытания переменным напряжением 4,2 кВ в течение 1 мин. Всего было проведено 10 циклов; все макеты выдержали испытание. После 10 циклов макеты были помещены в камеру при относительной влажности $97 \pm 3 \%$, и после выдержки в течение 10 сут определялось сопротивление и пробивное напряжение изоляции. Сопротивление изоляции макетов непосредственно после извлечения из гигростата и удаления росы с поверхности выходных концов составляло $(2 \div 8) 10^9$ Ом. После выдержки на воздухе при температуре 20 °C в течение 2 ч сопротивление изоляции увеличилось до $(2 \div 4) 10^{10}$ Ом. Эти данные показывают, что наблюдается только увлажнение поверхности изоляции за счет конденсации влаги; объемное увлажнение не наблюдалось. Результаты определения пробивного напряжения этих макетов приведены на рис. 6.1. Электрическая прочность изоляции, подвергнутой 10 циклическим воздействиям и последующей выдержке в течение 10 сут в среде с относительной влажностью $97 \pm 3 \%$, находится на уровне 25—35 кВ/мм, т.е. составляет 92—95 % исходного состояния.

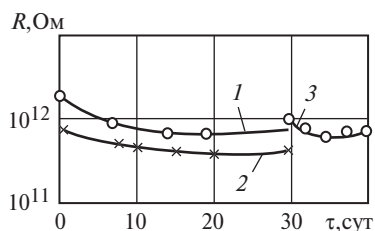


Рис. 6.6. Зависимость сопротивления изоляции «Монолит-2» моноблоков главных полюсов электродвигателей типов ДК-259 (кривые 1 и 3) и НБ-418к (кривая 2) от времени выдержки в воде:

1, 2 — изоляция в исходном состоянии; 3 — после семи циклов термоударов

Водостойкость изоляции «Монолит-2» определялась также на катушках и моноблоках главных и дополнительных полюсов электродвигателей типов ДК-259 и НБ-418к и якорях типа НБ-418к. На рис. 6.6 приведены зависимости сопротивления изоляции моноблоков главных и дополнительных полюсов электродвигателей типов ДК-259 и НБ-418к от времени выдержки в воде. Выдержка в течение 30 сут не привела к существенному снижению сопротивления изоляции моноблоков и составила $(6 \div 8) \cdot 10^{11}$ Ом. После выдержки в течение 20 сут моноблоки типа ДК-259 были подвергнуты семи циклам термоударов, состоящим из выдержки в криостате при температуре -50°C в течение 7,5 ч и в термостате при температуре 180°C в течение 16,5 ч, и затем определялось сопротивление изоляции в зависимости от времени выдержки в воде. Через 10 сут выдержки в воде было определено пробивное напряжение изоляции моноблоков, которое составило 18—25 кВ при толщине изоляции 1,1 мм.

Катушки главных полюсов типа НБ-418к были подвергнуты следующим испытаниям. Изоляция испытывалась напряжением промышленной частоты 8 кВ в течение 1 мин, и определялось сопротивление изоляции при напряжении 2,5 кВ и температуре 20°C (его значение превышало 10^{10} Ом). Катушки подвергались тепловому старению в термостате при температуре $195 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 300 ч. Контроль температуры осуществлялся термопарой, укрепленной на поверхности катушки. После теплового старения было проведено 10 циклов термоударов. Каждый цикл выполнялся в следующей последовательности: охлаждение до температуры $-50 \pm 2^\circ\text{C}$, нагревание медных проводников до 195°C пропусканием постоянного тока. Определение температуры осуществлялось измерением сопротивления.

После старения и термоударов проводились испытания для проверки сопротивления изоляции катушек при выпадении росы и инея с последующим оттаиванием (измерения температуры от -50 до 20°C), а также в процессе выдержки в течение 2 сут катушек при относительной влажности $98 \pm 2\%$ и температуре 40°C . Во время испытания за счет конденсации влаги на поверхности катушек сопротивление изоляции катушек, измеренное в гигростате, уменьшилось до 1—10 МОм. После извлечения катушек из гигростата оно быстро возрастало, что свидетельствовало об отсутствии объемного увлажнения. После сушки сопротивление изоляции катушек превышало 10^{10} Ом. Изоляция катушек выдержала испытание напряжением 4,8 кВ промышленной частоты в течение

1 мин. Одна из катушек была погружена в воду и испытана напряжением 38 кВ, при котором произошло перекрытие по поверхности изоляции. Вторая катушка аналогично была испытана на воздухе, и напряжение перекрытия у нее составило также 38 кВ. Пробивное напряжение изоляции катушек в трансформаторном масле составляло 54 кВ. В процессе выдержки якоря в воде периодически определялось сопротивление изоляции. После 144 ч сопротивление изоляции якоря оставалось неизменным и превышало 1000 МОм. Водостойкость якорей с серийной микалентной изоляцией была существенно ниже: после 2 ч выдержки в воде сопротивление изоляции стало меньше 0,1 МОм. Результаты проведенных испытаний свидетельствует о высокой водостойкости и влагостойкости якорей и полюсных систем с изоляцией «Монолит-2».

Изоляция «Монолит-2» обладает высокими механическими характеристиками. Предел прочности при растяжении при температуре 20 °С составляет $10,2 \cdot 10^7$ Н/м² и при температуре 155 °С — $4,8 \cdot 10^7$ Н/м², т.е. в 2—3 раза больше, чем у микалентной изоляции при температуре 20 °С и в 15—20 раз при рабочей температуре. Модуль упругости при растяжении при температуре 20 °С составляет $4,5 \cdot 10^{14}$ Н/м². Коэффициент термического линейного расширения, определенный в интервале температур от –55 до 150 °С, находится в пределах $(1,7 \div 2,0)10^{-5}$.

Применение вакуумнагнетательной пропитки эпоксидным компаундом позволило значительно увеличить жесткость обмотки якоря, а также вследствие высокой адгезии эпоксидного компаунда закрепить секции в пазах. Опыты показали, что усилие отрыва секции двигателя типа НБ-416Б от стенок паза составляет $185 \cdot 10^3$ Н/м при температуре 20 °С и $136 \cdot 10^3$ Н/м при температуре 150 °С. Коэффициент запаса по надежности крепления пазовой части обмотки якоря этого двигателя равен 3,7 при температуре 20 °С и 2,7 при температуре 150 °С. Циклические воздействия высоких и низких температур и увлажнения практически не изменили значение коэффициента запаса надежности крепления обмотки в пазу. Высокие значения усилий отрыва секций от стенок паза позволили рекомендовать изготовление опытной партии якорей без клиньев. Тесты показали также, что при изготовлении якорей по технологии «Монолит-2» можно уменьшить вдвое число витков бандажа на лобовых частях обмотки. Определение сравнительной надежности изоляции «Монолит-2» и стекломикалентной изоляции, включающее термическое старение при температурах 180, 200 и 220 °С, выдержку в криостате при температуре –50 °С, вибрацию, увлажнение и испытание изоляции электрическим напряжением, показало, что изоляция «Монолит-2» может быть отнесена к классу нагревостойкости F. Стекломикалентная изоляция, испытанная как основной вариант, по нагревостойкости также соответствует классу F, но так как эта изоляция после циклических испытаний теряет механическую прочность и имеет в 2 раза ниже электрическую прочность по сравнению с изоляцией «Монолит-2», то последняя более надежна

в эксплуатации и может обеспечить срок службы тяговых электродвигателей, соответствующий пробегу в 1,5—1,8 млн км.

Повышение степени использования материалов тяговых электрических машин (возрастание мощности в единице объема, увеличение нагрева) ставит задачу повышения точности тепловых расчетов на стадии проектирования. Для их выполнения необходимо знать теплопроводность якорных и статорных катушек в пазовой части, полюсных катушек и катушек компенсационных обмоток.

Изучение методов определения теплопроводности материалов показало, что при исследовании отвода тепла от катушек обмоток тяговых двигателей (ТД) локомотивов правомерно применение стационарного метода с использованием одномерного теплового потока и с нагревом исследуемого объекта электрическим током.

Теплообмен теплопроводностью внутри твердых тел происходит по закону Фурье, который устанавливает связь между удельной тепловой нагрузкой на единицу изотермической поверхности и производной температуры по направлению нормали n к этой поверхности. Отсюда следует, что тепловой поток Q , Вт, через поверхность площади F , m^2 , перпендикулярную его направлению, будет равен:

$$Q = \lambda F \left| \frac{dt}{dn} \right| = \lambda F \frac{\Delta t}{\delta}, \quad (6.1)$$

где Δt — перепад температур на изоляции, $^{\circ}C$; λ — теплопроводность, Вт/(м · К); δ — толщина изоляции, м.

Из (6.1) можно определить значение λ , Вт/(м · К):

$$\lambda = \frac{Q\delta}{F\Delta t}. \quad (6.2)$$

Теплопроводность определяет количество теплоты, которое проходит в единицу времени через единицу поверхности при изменении температуры на один градус на единицу пути теплового потока. Его значение для различных веществ зависит от их молекулярной структуры, плотности, теплоемкости, вязкости, влажности и температуры. Для составных тел (пакетов активной стали, сплошных и шихтованных магнитопроводов, меди обмоток, корпусной изоляции и изоляции лобовых частей обмоток) он зависит от композиции элементов, технологии их склейки и термообработки, пропитки, доли связующего вещества в композиции, характера укладки и намотки материалов, наличия воздушных прослоек.

Как следует из уравнения Фурье, для определения теплопроводности материала необходимо знать для испытуемого образца с конкретными геометрическими параметрами пронизывающий его тепловой поток и перепад температур. Мощность тепловыделения, создающего тепловой поток, как известно, определяется произведением падения напряжения на проводнике на проходящий через него ток. Для обмоток ТД необходимо определять температуру поверхности,

к которой прилегает изоляция (она принимается равной температуре внутренней поверхности изоляции), и температуру ее наружной поверхности.

Температура внутренней поверхности изоляции (температура горячей обмотки, °C) принималась равной температуре меди. Она определялась методом вольтметра-амперметра по методике, изложенной в ГОСТ 11828 из выражения

$$t_{\Gamma} = \frac{\frac{R_x}{R_{\Gamma}} (1 + \alpha t_x) - 1}{\alpha}, \quad (6.3)$$

где R_x — сопротивление холодной обмотки, Ом · мм²/м; R_{Γ} — сопротивление горячей обмотки, Ом · мм²/м; α — температурный коэффициент сопротивления, 1/°C.

Измерение сопротивления R_x выполнялось при питании от аккумуляторной батареи, а R_{Γ} — от генератора.

В выражение (6.3) для определения температуры обмотки входит величина α . Значение этой величины определяют индивидуально для материала каждого исследуемого изделия и вычисляют по формуле:

$$\alpha = \frac{R_{\Gamma} - R_x}{t_{\Gamma} R_x - t_x R_{\Gamma}}. \quad (6.4)$$

Для нахождения сопротивления обмоток R_{Γ} и R_x при соответствующих температурах t_x и t_{Γ} исследуемая обмотка помещалась в термостат, достигалась требуемая температура и методом вольтметра-амперметра определялись значения R_{Γ} и R_x . Температура наружной поверхности изоляции обмотки определялась двумя способами: термопарами и тепловизором ТВ-03.

При первом способе термопары укреплялись равномерно по поверхности исследуемого объекта. Показания ЭДС термопар в стационарном тепловом режиме усреднялись (определялась средняя температура наружной поверхности, °C, с учетом размеров изотермических участков объекта:

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^n t_{\text{п}} F_{\text{п}}}{\sum_1^n F_{\text{п}}}, \quad (6.5)$$

где $t_{\text{п}}$ — температура изотермической поверхности площадью $F_{\text{п}}$, °C.

Горячие спаи термопар были припаяны к тонким медным пластинкам, которые укреплялись на исследуемых поверхностях с помощью клея.

Качественная и количественная картина распределения температурных полей на поверхности исследованных объектов была получена также с помощью тепловизора ТВ-03, позволяющего наблюдать распределение температуры по поверхности объекта в виде его изображения с различной яркостью участков,

имеющих разную температуру. При этом более нагретым участкам соответствовали более светлые участки изображения. Прибор позволял калибровать яркость участков уровнями реальной температуры и, таким образом, оценивать реальную температуру соответствующих участков исследуемого объекта. Температура $t_{\text{ср}}$ определялась по (6.5). Исследования проводились на натуральных образцах либо на макетах, изготовленных в соответствии с технологией изготовления изделий. При измерении температур наружных поверхностей изоляции исследуемых объектов использовались термопары хромель-алюмель в комплекте с вторичным прибором — цифровым вольтметром В7-21. На изделии устанавливалось от 20 до 40 термопар. При работе с тепловизором на поверхности объекта в произвольном месте устанавливалась одна термопара. Измеренная в установившемся тепловом режиме температура являлась калибровочной, по сравнению с которой определялись температуры в других точках исследуемых поверхностей. Это позволило установить положение изометрических поверхностей, их площадь и температуру, что повысило точность исследований.

Работы проводились на трех образцах каждого типа изделия при различных значениях температуры меди катушек. Последнее достигалось пропусканием по катушкам тока различного значения. При каждом значении тока опыты дублировались не менее 3 раз. Режим нагрева катушек считался установившимся, если средняя температура поверхности в течение полчаса оставалась неизменной.

Обработка опытных данных проводилась методом корреляционного анализа. Многими исследователями установлена зависимость теплопроводности от температуры вида $\lambda = a + bt$. В процессе обработки экспериментальных данных при известном виде аппроксимирующей функции задача сводилась к отысканию численных значений коэффициентов a и b , при которых достигается наилучшее согласие данных с опытными точками. Величины a и b определялись с использованием метода наименьших квадратов. Применение этого метода приводит к двум уравнениям с двумя неизвестными:

$$na + b \sum t = \sum \lambda; \quad (6.6)$$

$$a \sum t + b \sum t^2 = \sum t \lambda, \quad (6.7)$$

где n — число измеренных значений параметров.

В результате решения этих уравнений получаем:

$$a = \frac{\sum \lambda \sum t^2 - \sum t \lambda \sum t}{n \sum t^2 - \left(\sum t \right)^2}; \quad (6.8)$$

$$b = \frac{n \sum t \lambda - \sum \lambda \sum t}{n \sum t^2 - \left(\sum t \right)^2}. \quad (6.9)$$

Коэффициент корреляции r (показатель статистической зависимости между t и λ) определяется из уравнения:

$$r = \frac{\sum (t - \bar{t})(\lambda - \bar{\lambda})}{\sqrt{\sum (t - \bar{t})^2 \sum (\lambda - \bar{\lambda})^2}}, \quad (6.10)$$

где $\bar{t}$ и $\bar{\lambda}$ — средние значения параметров.

Значение r составляли 0,37—0,9. В подавляющем числе экспериментов $r > 0,5$, что свидетельствовало о достаточном приближении результатов эксперимента к функциональной линейной зависимости $\lambda = f(t)$.

По описанной методике в ВЭЛНИИ были проведены исследования изоляции типа «Монолит-2», «Монолит-4», а также изоляции на основе стекломикаленты ЛМК-ТТ и стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5-СПл. Результаты исследований приведены на рис. 6.7.

Лучшей из исследованных композиций является изоляция «Монолит-2», теплопроводность которой равна 0,11—0,25 Вт/(м · К). Высокую теплопроводность имеет также изоляция «Монолит-4», она составляет 0,15—0,17 Вт/(м · К).

Причиной низкой теплопроводности изоляции ЛМК-ТТ является наличие локальных воздушных прослоек между медным проводником и изоляцией. Это выяснилось при исследовании тепловой картины поверхностей изоляции с

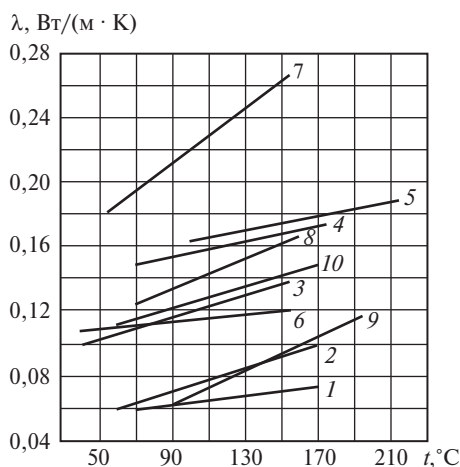


Рис. 6.7. Теплопроводность различных видов изоляции:

1 — катушка главного полюса ТД НБ418К6 с изоляцией ЛМК-ТТ; 2 — катушка добавочного полюса ТД НБ418К6 с изоляцией ЛМК-ТТ; 3 — катушка главного полюса ТД НБ501 с изоляцией «Монолит-2»; 4 — катушка добавочного полюса ТД НБ501 с изоляцией «Монолит-2»; 5 — катушка главного полюса ТД НБ508А с изоляцией «Монолит-2»; 6 — катушка добавочного полюса ТД НБ501 с изоляцией «Монолит-2»; 7 — катушка якоря ТД НБ501 с изоляцией «Монолит-2»; 8 — катушка якоря ТД НБ508А с изоляцией «Монолит-4»; 9 — компенсационная обмотка ТД НБ418К6 с изоляцией ЛСЭК-5-СПл; 10 — катушка якоря ТД НБ418К6 с изоляцией ЛСЭК-5-СПл

помощью тепловизора. Так, тепловая картина главного полюса двигателя НБ-418К6, снятая при температуре медного проводника 162 °С, показывает, что на поверхности изоляция имеет температуру от 82 до 66 °С. Таким образом, температуры поверхности изоляции на отдельных участках отличаются на 20—40 %. Аналогичные результаты получены и для катушек добавочного полюса ТД НБ-418К6.

Распределение температур по поверхности объектов с изоляциями типа «Монолит» имеет меньший разброс. Изучение распределения температуры по поверхности объектов с изоляцией типа «Монолит» показало, что неоднородность тепловой картины наблюдается только в отдельных местах, а максимальное различие температур разных участков поверхности катушек не превышает 10 %. По теплопроводности более предпочтительной является изоляция типа «Монолит-2», которая и рекомендована к применению в тяговых двигателях локомотивов.

Применение вакуум-нагнетательной пропитки якорей и полюсных моноблоков эпоксидным компаундом позволило на 20—40 % снизить перегревы обмоток за счет высокой теплопроводности изоляции и повышенной теплоотдачи, повысить водостойкость и виброустойчивость изоляции. Экспериментально установлено, что при применении пропитки якорей эпоксидным компаундом увеличивается жесткость и виброустойчивость и уменьшается биение коллектора.

Двигатели угольных комбайнов работают в более тяжелых эксплуатационных условиях по сравнению с двигателями общепромышленного назначения. К их числу относятся:

- неравномерный нагрузочный режим работы двигателей, который часто приводит к превышению температуры изоляции обмоток значительно выше номинальной;
- электромагнитные взаимодействия между секциями во время частых пусков и периодических опрокидываний, вызывающих значительные механические деформации обмоток;
- воздействие на изоляцию нагретого машинного масла, проникающего в двигатель из редуктора, и солидола из подшипников, а также воды, попадающей внутрь по кабельному вводу.

Среда в шахтах характеризуется высокой относительной влажностью, достигающей 95—98 % при температуре 35 °С, запыленностью до 20 г/м³, наличием воды с большим содержанием солей и кислот. В нерабочем состоянии внутри двигателя образуется конденсат, что особенно характерно для двигателей с водяным охлаждением вследствие интенсивного охлаждения корпуса и перепада температур по сравнению с нагретой обмоткой в момент отключения.

Анализ опыта эксплуатации двигателей угольных комбайнов показал, что электрическая прочность и класс нагревостойкости не являются решающими характеристиками, определяющими срок службы изоляции обмоток этих двигателей. Наиболее важными свойствами изоляции обмоток, от которых в первую

очередь зависит долговечность двигателей, являются влагостойкость, маслостойкость, виброустойчивость и механическая прочность. Ниже, приведены результаты сравнительных испытаний на макетах и двигателях угольных комбайнов двух типов изоляции: из микаленты ЛФК-ТТ с пропиткой кремнийорганическим лаком, применяемой для серийных двигателей, и изоляции «Монолит», выполняемой из непропитанной стеклослюдопластовой ленты или стекломикаленты с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой статоров термореактивным компаундом ПК-11. Односторонняя толщина корпусной серийной изоляции и изоляции «Монолит-2» равна 1 мм.

Определение пробивного напряжения изоляции «Монолит-2» проводилось на секциях двигателей типа ЭКВ-4, а испытания механической прочности — на стержнях, состоящих из набора медных проводников ПСД, имеющих разрез в средней части. Сечение изоляции стержней примерно равно сечению изоляции секции.

Оценка влагостойкости изоляции проведена на обмотках двух двигателей ЭКВ-4, помещенных во влагокамеру и подвергавшихся воздействию циклического температурного режима в течение 7 сут. Суточный цикл испытаний состоял из 16 ч увлажнения при температуре 55 °С и 8 ч охлаждения до температуры 40—45 °С, относительная влажность воздуха находилась в пределах 95—98 %, скорость его движения 4,5 м/с. Испытание изоляции на устойчивость к воздействию термодинамических нагрузок и одновременно на масло- и влагостойкость проводилось методом реверсирования двигателей, находящихся во влагокамере, при температуре окружающей среды 35 °С и относительной влажности 95—98 %. Предусматривалось, что каждый двигатель должен выдержать по 50 тыс. реверсов, в том числе по 25 тыс. реверсов с заливкой агрессивной смеси, состоящей из следующих компонентов: машинного масла 30 %, сои-дола 30 %, шахтной кислотной воды (рН-0,8) 25 %, угольной пыли 15 %.

Нагрузка, равная 50 тыс. реверсов, была выбрана на том основании, что во время эксплуатации двигатель узкого захватного комбайна имеет в среднем указанное количество пусков. Во время испытаний реверсы двигателя следовали через каждые 5 с. Нагрев изоляции обмотки до температуры 175—180 °С происходил примерно через 300 реверсов. Двигатель отключался от сети, изоляция обмотки интенсивно охлаждалась до температуры 100 °С. Указанный режим продолжался в течение 16 ч в каждом суточном цикле испытаний. В течение 8 ч двигатель находился во влагокамере в нерабочем состоянии. После выполнения 25 тыс. реверсов каждым двигателем через коробку проводов заливало по 200—250 г смеси указанного состава (через каждые 500 реверсов). Критерием оценки состояния изоляции обмоток в результате термодинамических испытаний и оценки масло- и влагостойкости являлось сохранение нормального функционирования и уровня сопротивления изоляции не менее 0,5 МОм.

Пробивное напряжение изоляции «Монолит-2», выполненной на основе слюдосодержащих материалов, примерно в 2 раза превышает аналогичные зна-

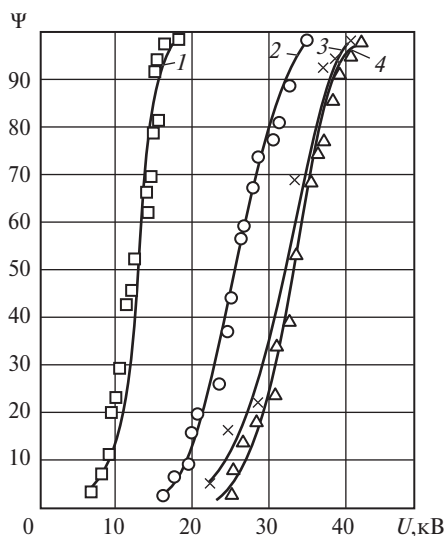


Рис. 6.8. Интегральная вероятность пробивных напряжений серийной (кривая 1) изоляции и изоляций «Монолит» (кривые 2, 3, 4) секций обмоток двигателей ЭКВ-4:

1 — микалента ЛФК-ТТ; 2 — стекломикалента ЛМР-СС; 3 — пленкостеклослюдопласт; 4 — стеклослюдопласт

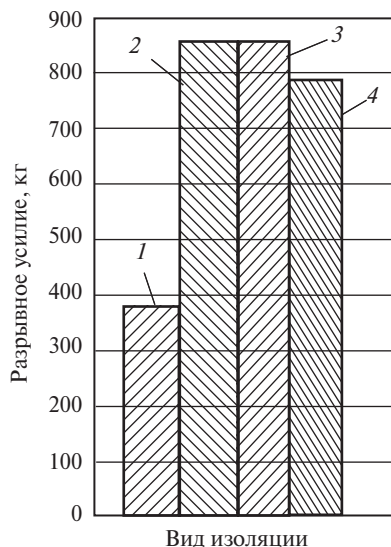


Рис. 6.9. Разрывная прочность различных видов изоляции:

1 — кремнийорганика, микалента ЛФК-1; 2 — «Монолит-2», микалента ЛМР-СС; 3 — «Монолит-2», пленкостеклослюдопласт; 4 — «Монолит-2», стеклослюдопласт

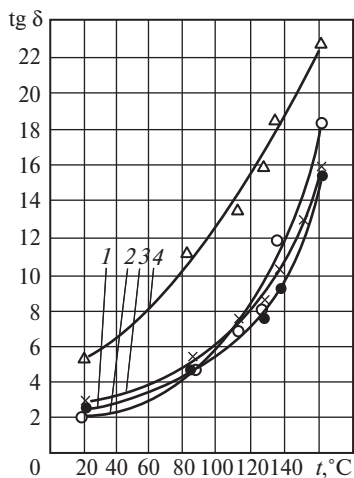


Рис. 6.10. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ изоляции «Монолит-2» (кривые 1, 2, 3) и МКИ (кривая 4) секции обмоток двигателей ЭКВ-4 от температуры при напряжении 3 кВ:

1 — стекломикалента ЛМР-СС; 2 — пленкостеклослюдопласт; 3 — стеклослюдопласт; 4 — микалента

чения для серийной изоляции (рис. 6.8). Это указывает на значительный запас пробивного напряжения изоляции «Монолит-2» и на возможность снижения толщины корпусной изоляции двигателей.

Как следует из диаграммы на рис. 6.9, изоляция «Монолит-2» более чем в 2 раза механически прочнее микалентной.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры (рис. 6.10) показывает, что изоляция «Монолит-2» имеет более плотную структуру.

При исследовании зависимости сопротивления изоляции «Монолит-2» и МКИ от времени увлажнения было установлено, что при изменении температуры во влажной камере от -50 до 40 °С сопротивление изоляции «Монолит-2» уве-

личивалось на два-три порядка величины, достигая 100—200 МОм, в то время как для МКИ сопротивление составляло 50—700 кОм. Значительное изменение сопротивления изоляции «Монолит-2», связанное с изменением температуры во влагокамере, указывает на поверхностный характер увлажнения обмотки двигателя угольного комбайна в шахте, равное 70 кОм, которое хорошо согласуется со значением 50—60 кОм, полученным в конце испытаний. Минимальное сопротивление изоляции «Монолит» обмотки двигателя в конце испытания больше 0,5 МОм, что на порядок выше, чем у МКИ.

В процессе воздействия термодинамических нагрузок при реверсировании двигателей во влагокамере без заливки маслоугольной смеси сопротивление изоляции «Монолит-2» находится на уровне 30 МОм. После окончания первых 25 тыс. реверсов и перевода двигателей на увлажнение в постоянном режиме при температуре 35 °С в течение 2 сут сопротивление было также в пределах десятков мегаом. Воздействие пусковых токов и сопровождающего их теплового старения изоляции не привело к снижению сопротивления. Если сопротивление изоляции «Монолит-2» после включения двигателей в режим реверсирования возросло через несколько часов от 3 до 200 МОм (измерено при температуре 105 °С), то сопротивление МКИ возросло от 100 кОм до 10 МОм через 3 дня реверсирования, а после окончания 25 тыс. реверсов и перевода двигателей в постоянный режим увлажнения сопротивление снизилось до 1 МОм.

Эти примеры указывают на увлажнение МКИ по толщине. Во время последующего реверсирования двигателей через коробку выводных проводов внутрь двигателя заливалась маслоугольная смесь массой 13 кг. Сопротивление изоляции «Монолит-2» при этом изменилось незначительно (несколько меньше 10 МОм). После увлажнения двигателей при температуре 35 °С в течение 2 сут минимальное сопротивление изоляции обмоток равнялось 1,8 МОм. Таким образом, влияние динамических нагрузок на изоляцию «Монолит», сопровождаемое одновременным воздействием маслоугольной смеси, воды и теплового старения, не привело к нарушению нормального функционирования двигателей. При заливке маслоугольной смеси двигатели с МКИ вышли из строя вследствие межфазного короткого замыкания до выполнения запланированных 25 тыс. реверсов (табл. 6.1). Анализ повреждений обмотки показал, что в результате действия динамических усилий произошло перетирание изоляции в лобовых частях. Несколько секций имели протертую изоляцию в пазу и на выходе из него.

В результате осмотра обмоток двигателей с изоляцией «Монолит-2» не обнаружено каких-либо видимых повреждений, вызванных реверсированием двигателей. Обмотка статора, погруженная в воду после испытаний реверсированием в течение 21 сут, имела сопротивление изоляции 100 МОм. Хорошее состояние изоляции «Монолит-2» после испытаний подтверждается высоким значением остаточного пробивного напряжения обмотки, равным 9 кВ. Эпоксидный компаунд, имеющий высокую адгезию к материалам корпусной изоляции обеспечивает также хороший контакт и склеиваемость изоляции с пазом

Таблица 6.1

Результаты сравнительных испытаний МКИ и изоляции «Монолит-2»							
Тип изоляции	Номер двигателя	Сопротивление изоляции обмотки, МОм		Количество реверсов			Примечание
		перед испытаниями	в конце испытаний на влагонепстойкость	во влажной среде	с заливкой смеси	общее	
«Монолит-2»	1	1000	0,9	25 000	25 000	50 000	Двигатели находятся в рабочем состоянии
	2	1000	0,6	25 000	25 000	50 000	
МКИ	3	30	0,06	25 000	2300	27 300	Двигатели вышли из строя в результате межфазного короткого замыкания
	4	150	0,07	25 000	18 400	43 400	

Таблица 6.2

Перегревы обмоток двигателей с различными видами изоляции					
Тип двигателя	Вид изоляции	Перегрев обмотки, °С	Мощность двигателя, кВт	Увеличение мощности, %	
ЭКВ-4У	Микалента ЛФК-ТТ	120	105	—	
	«Монолит-2»	95	105	—	
	«Монолит-2»	120	118	11,2	
ЭКВ-4	Микалента ЛФК-ТТ	120	120	—	
	«Монолит-2»	98	120	—	
	«Монолит-2»	120	131,6	10,98	

сердечника статора. Пропитывающий состав на основе эпоксидных смол способствует получению более высокой жесткости обмоток по сравнению с кремнийорганическим лаком. Высокая механическая прочность и жесткость обмоток с изоляцией «Монолит-2» при комнатной и рабочих температурах обеспечивают ей в совокупности лучшую устойчивость к динамическим усилиям по сравнению с МКИ. Изоляция «Монолит» по сравнению с МКИ имеет повышенную теплопроводность, обусловленную плотной структурой. В двигателях угольных комбайнов типа ЭКВ-4, ЭКВ-4У, в которых МКИ заменена на изоляцию «Монолит-2», перегревы обмотки снижены на 20—25 °С. Если принять в расчет существующие перегревы для серийных двигателей, то мощность опытных образцов с изоляцией «Монолит» возросла примерно на 11 % (табл. 6.2).

Изоляцию типа «Монолит» можно применять не только в электродвигателях, но и в трансформаторах. Например, питание электродвигателей забойных механизмов осуществляется шахтными трансформаторами, работа которых во многом определяется режимом работы электродвигателей угольных комбайнов. Этот режим повторно-кратковременный с частыми включениями и отключениями (ВО), машинное время их составляет в среднем 8 ч в сутки. Среднее количество ВО в сутки равно 1000 (в зависимости от типа комбайна это значение изменяется от 400 до 1600). Продолжительность цикла ВО при средней частоте включений равна 15—30 с, при максимальной 2—3 с.

При этих режимах работы электродвигателя угольного комбайна ток трансформатора превосходит номинальный в 2—3 раза, а при более тяжелом режиме — пуске электродвигателя под нагрузкой или при его опрокидывании — ток трансформатора достигает четырех-, шестикратной величины номинальной, пусковая мощность превышает установленную в 2—3 раза. Под воздействием пусковых токов повышение температуры медных проводников происходит с большей скоростью, вследствие чего в изоляции появляются значительные внутренние напряжения, которые при наличии резких перепадов тепла могут привести к ее разрушению.

Испытания проводились для оценки стойкости изоляции «Монолит» к воздействию термомеханических напряжений, возникающих в переходных режимах работы шахтных трансформаторов. Изоляция «Монолит-2» испытывалась при воздействии термомеханических напряжений, вызванных протеканием токов I_k и $1,25I_k$ в количестве не менее 50 раз. Для проведения испытаний изготовлено по пять катушек высокого (ВН) и низкого (НН) реального шахтного трансформатора мощностью 400 кВ · А.

В исходном состоянии изоляция катушек испытана в течение 1 мин при напряжении 16 и 3 кВ. Обмотки высокого и низкого напряжения трансформатора выполнены чередующимися из дисковых катушек. Толщина изоляции катушки ВН равна 2 мм на сторону, катушки НН — 1 мм. Термомеханические воздействия на изоляцию катушек проводились как в холодном, так и в нагретом до 135 °С состоянии. Каждая катушка ВН и НН подвергалась 50 включениям, в том числе 40 при действии I_k и 10 — при $1,25I_k$.

Из каждых 10 включений при I_k и $1,25I_k$ пять выполнялись из холодного состояния и пять при температуре 135°C , в том числе четвертое включение длительностью 1 с, пятое включение — 5 с. Интервал между включениями равен 1 с, остальные 30 включений при токах I_k проводились из холодного состояния с интервалом между включениями 2 мин.

Критерием оценки стойкости изоляции «Монолит-2» к действию термических и динамических ударов являлось испытание одноминутным напряжением 13 кВ для катушек ВН и 2,5 кВ для НН. Напряжение прикладывалось к изоляции, находящейся в нагретом состоянии, непосредственно после указанных воздействий. Контроль состояния изоляции осуществлялся также путем измерения сопротивления изоляции мегаомметром МС-0,5 при напряжении 2,5 кВ. На рис. 6.11 и 6.12 представлены кривые измерения температуры медного проводника и внешнего слоя изоляции катушек ВН и НН от времени нагрева при различных скоростях нарастания температуры.

При расчетной плотности тока короткого замыкания обмотки ВН $49,7\text{ А/мм}^2$ после пяти включений температура медных проводников катушек повысилась от $12,5$ до 143°C , что соответствует средней скорости нарастания температуры $14,5^\circ\text{C/с}$. Воздействия указанных факторов на предварительно нагретые до 135°C катушки вызвали нагрев медных проводников до 262°C , а перепад тепла при толщине изоляции 2 мм составил 216°C (см. рис. 6.11, кривые 2, 2'). Плотность тока превышала рабочую в 28,5 раза. При токе $1,25I_k$, что соответствует плотности $63,5\text{ А/мм}^2$, после пяти включений максимальная температура медных проводников достигла 336°C , а перепад при толщине корпусной изоля-

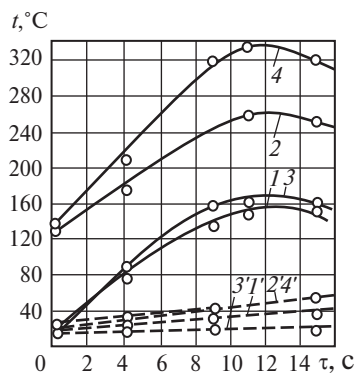


Рис. 6.11. Зависимость температуры медных проводников (кривые 1—4) и внешней изоляции (кривые 1'—4') катушек ВН от времени нагрева током со скоростью роста температуры $14,5^\circ\text{C/с}$ (кривые 1, 1'), $12,8^\circ\text{C/с}$ (кривые 2, 2'), 16°C/с (кривые 3, 3'), $20,6^\circ\text{C/с}$ (кривые 4, 4')

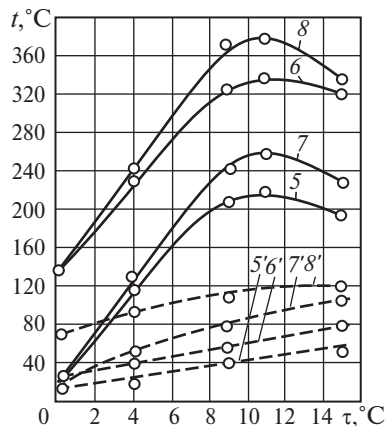


Рис. 6.12. Зависимость температуры медного проводника (кривые 5—8) и внешней изоляции (кривые 5'—8') катушек НН от времени нагрева током со скоростью роста температуры 22°C/с (кривые 5, 5'), $21,7^\circ\text{C/с}$ (кривые 6, 6'), $28,5^\circ\text{C/с}$ (кривые 7, 7'), $26,4^\circ\text{C/с}$ (кривые 8, 8')

Рис. 6.13. Интегральная вероятность пробивного напряжения изоляции НН (кривые 1, 1') и ВН (кривые 2, 2'):

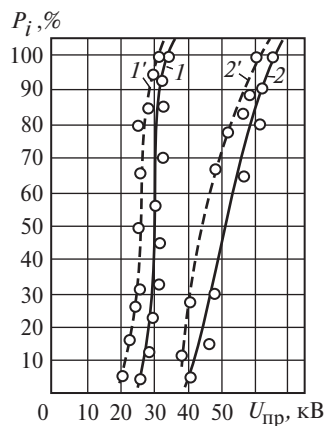
— в исходном состоянии; --- после термических и динамических воздействий

ции равнялся 290 °С (см. рис. 6.11 кривые 4, 4'). Минимальное зафиксированное сопротивление изоляции катушек ВН при этих испытаниях составило 1700 МОм.

После каждого пяти включений тока I_k и $1,25I_k$ изоляция всех катушек ВН выдержала испытание напряжением 13 кВ в течение 1 мин. Максимальная плотность тока при испытании катушек НН была 65,5 А/мм², что в 35,4 раза превышало номинальную плотность. В конце пятого включения при указанной плотности тока температура медных проводников предварительно нагретых до 135 °С катушек составила 382 °С, а перепад тепла при толщине изоляции 1 мм равнялся 262 °С (см. рис. 6.12, кривые 8 и 8'). Скорости роста температуры медного проводника катушек НН при прохождении токов I_k и $1,25I_{кз}$ изменялись в пределах 22—28,6 °С/с. Все катушки НН выдержали в нагретом состоянии испытание напряжением 2,5 кВ в течение 1 мин, сопротивление изоляции составляло не менее 1000 МОм.

После окончания термомеханических испытаний изоляция катушек ВН в холодном состоянии последовательно выдержала напряжение 16, 18 и 21 кВ в течение 1 мин. Затем катушки были пробиты. Интегральные кривые пробивных напряжений изоляции катушек ВН и НН в исходном состоянии и прошедших испытания приведены на рис. 6.13. Значения пробивных напряжений изоляции катушек после воздействия термомеханических напряжений, вызванных токами I_k и $1,25I_k$, мало отличаются от значений, полученных в исходном состоянии. Проведенные испытания показали высокую устойчивость изоляции «Монолит» к действию термических и динамических нагрузок высокой интенсивности.

Изоляцию «Монолит-2» применяют в обмотках тяговых электродвигателей электропоездов, трамваев, троллейбусов, метро, крановых двигателей, двигателей грузовых самосвалов мотор-колесо, сухих трансформаторов и т.д.



Глава седьмая

ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ОБМОТОК С ИЗОЛЯЦИЕЙ «МОНОЛИТ-2»

Широкое применение изоляции «Монолит-2» для обмоток электрических машин выявило необходимость решения проблемы ремонта этих обмоток. Несмотря на то что изоляция обмотки обладала высокими электрическими и эксплуатационными свойствами, на стадии внедрения этой технологии на заводах или при неправильной эксплуатации имели место случаи пробоя изоляции. Традиционный метод ремонта — замена катушки с пробитой изоляцией на новую — в данном случае применить было затруднительно, так как обмотка в результате пропитки склеивалась с пазом статора и извлечь катушки из пазов статора без повреждения изоляции было невозможно.

Для извлечения катушек из паза был разработан технологический прием, когда под покрывную стеклянную ленту на пазовую часть катушки наносилась фторопластовая пленка с зазором для обеспечения пропитки изоляции. В результате при пробое покрывная изоляция срезалась и катушки за счет антиадгезионных свойств фторопластовой пленки могли быть извлечены из пазов. Но при этом использовать их в дальнейшем было невозможно, так как из-за жесткости в лобовых частях изоляция повреждалась при извлечении. Такое решение упрощало извлечение обмоток из пазов и сохраняло листы статора. Термический отжиг изоляции при температуре свыше 250 °С приводил к полному разрушению изоляции обмоток. Обмотки легко извлекались из пазов статора. Однако при этом полностью разрушался и изоляционный лаковый слой листа, железо статора в таком виде дальнейшему использованию не подлежало.

Таким образом, термический способ ремонта приводил к разрушению как обмотки, так и листа статора, и был не целесообразен. Поэтому стали рассматривать возможность разрушения эпоксидного компаунда в изоляции химическими методами. Например, известен способ деполимеризации отвержденной эпоксидной смолы путем обработки ее насыщенным водным раствором углекислого газа при температуре 170—220 °С и давлении $(10 \div 26)10^4$ Па. В результате такой обработки отвержденная эпоксидная смола превращалась в вязкую массу, хорошо растворимую в ацетоне. Однако применение последнего не обеспечивало полного удаления продуктов деполяризации эпоксидной смолы из обмоток электрических машин и делало процесс пожаро- и взрывоопасным.

Для полного удаления деполяризованной эпоксидной смолы из конструкций и упрощения технологического процесса было предложено проводить обработку смесью водного раствора углекислого газа и органического растворителя с параметрами растворимости 9,7—12,3 и температурой кипения выше 100 °С

Таблица 7.1

Условия и результаты удаления терморезактивной изоляции, полученной по системе «Монолит-2», с медных шинков, имитирующих токопроводящую обмотку и листы статора

Условия проведения испытаний						Результаты разварки		
Тип	Растворитель			Время обработки, ч	Температура обработки, °C	Давление, Па	Листы статора с лаковым покрытием КФ-965	Изоляция шинок
	Содержание, %	Параметр растворимости	Температура кипения, °C					
Н-бутанол	5	10,7	117,5	24	180	11,3	$R \gg 200 \text{ Ом}$	Изоляция разваривается на два-три слоя, снимается с шинки
	10		117,5	24	180	11,3	Потерян блеск, $R \gg 200 \text{ Ом}$	Изоляция разваривается на три-четыре слоя, снимается с шинки
	10		117,5	12	180	11,0	$R \gg 200 \text{ Ом}$	Изоляция разваривается на один-два слоя, снимается с шинки
	10		117,5	12	120	2,0	$R < 60 \text{ Ом}$	Изоляция остается твердой, не разваривается
	95		117,5	24	130	2,0	$R < 60 \text{ Ом}$	Изоляция не разрушается, слегка белее
	95		117,5	8	160	6,0	$R < 60 \text{ Ом}$	Изоляция разваривается на три-четыре слоя, легко удаляется с шинки
	10		117,5	8	160	8,0	$R \gg 200 \text{ Ом}$	Изоляция разваривается на один-два слоя
Этилцеллозоль	—	12,3	137,0	8	160	6,0	$R > 200 \text{ Ом}$	Изоляция разваривается на два-три слоя
Диметилформамид	—	12,37	156,0	12	180	7,0	—	Изоляция не разваривается, становится белой, мутной
Толуол	—	9,3	110,0	12	180	11,0	—	Изоляция не разваривается, слегка белее

при разных соотношениях между ними. Использование растворителей с параметрами растворимости менее 9,7 не привело к эффективному разрушению отвержденной смолы из-за плохой совместимости их с водой. Растворители с параметрами выше 12,3, как правило, хорошо смешиваются с водой, но плохо растворяют продукты деполимеризации. При использовании растворителей с температурой кипения ниже 100 °С трудно поддерживать нужные температуру и давление. Поэтому были проведены исследования макетов обмоток изоляции в виде медных шин размер 6×30×1000 мм при толщине изоляции 2 мм и листы статора, лакированного лаком КФ-965 с применением различных типов растворителей. Варьировались содержание растворителя, время, температура и давление (табл. 7.1). Наилучшие результаты получены на 10 %-ном составе с растворителем Н-бутанол.

В результате проведенной технологии «разварки» изоляция, представляющая собой монолитную конструкцию, легко разматывалась и снималась с шинки. По результатам удаления термореактивной изоляции «Монолит-2» с макетов исследования были перенесены на натурные обмотки.

Обмотанный сердечник двигателя 2АЗМ мощностью 800 кВт на напряжение 6 кВ помещают в автоклав и заливают 10 %-ной смесью бутанола с водой (параметр растворимости бутанола 10,7). К нижнему штуцеру автоклава присоединяют баллон с углекислым газом. При открытом выпускном вентиле смесь насыщают в течение 10—15 мин углекислым газом. Закрывают выпускной вентиль и создают давление углекислым газом $1,5 \cdot 10^5$ Па. Вентили перекрывают, а автоклав нагревают до 160—170 °С, давление при этом повышается до $8 \cdot 10^5$ Па. При этих условиях осуществляют выдержку в течение 48 ч. Затем автоклав охлаждают и из него вынимают обмотанный статор. После обработки катушки легко извлекаются из пазов статора. Связующее разрушается на глубину трех-четырех слоев. Паз после удаления остается чистым. После удаления обмотки статор испытали на потери в железе. Удельные потери составили 0,9 Вт/кг при максимально допустимых 3,18 Вт/кг.

Однако вторичное использование катушек оказалось невозможным ввиду механических повреждений при извлечении обмотки. Поэтому при дальнейшем использовании этого метода ремонта лобовые части статора обрезают на станке, а пазовые части извлекали из статора по разработанной технологии «Монолит-2».

Глава восьмая

ИЗОЛЯЦИЯ, ИЗГОТОВЛЯЕМАЯ ИЗ ПРОПИТАННЫХ ЛЕНТ

8.1. Изоляция типа ВЭС на основе насыщенной связующим (пропитанной) стеклослюдинитовой ленты для турбо- и гидрогенераторов

Исследования, проведенные в плане изучения возможных способов введения связующих в ленты на основе слюдяных бумаг, показали, что при подборе связующего с соответствующими характеристиками вязкости, необходимое его количество в один слой бумаги может быть введено путем простого погружения ее в связующее. Это давало возможность создания изоляционных лент на заводах, производящих изоляционные материалы. Дальнейшие исследования для подбора типа связующих показали, что термопластичные связующие не могут быть применены для лент из слюдяных бумаг, поскольку изоляция из таких лент при нагреве до рабочих температур могла легко повреждаться. Положительные результаты были получены лишь при использовании в качестве связующего термореактивных составов. Ленты, пропитанные такими составами, будучи отвержденными под давлением, образуют композиционный материал с высокими электрическими и механическими свойствами.

Таким образом, была показана целесообразность разработки на основе слюдяных бумаг пропитанных лент, которые при использовании их на электромашиностроительных заводах не требовали бы дополнительной пропитки. Слюдяная бумага, даже полностью пропитанная термореактивным, но неотвержденным связующим, имеет очень небольшую прочность при растяжении и очень небольшое удлинение при разрыве. Поэтому в качестве подложки приходится использовать материалы, обладающие высокими прочностными характеристиками и малым удлинением при растяжении. Наилучшие результаты дает использование в качестве армирующих подложек, с которыми склеивается слюдяная бумага, стекловолоконистых тканых материалов. Положительные результаты дает использование в качестве одной из подложек стеклянных или синтетических бумаг, пленок при условии, что вторая подложка стеклотканевая.

Одной из разновидностей насыщенных связующих лент является стеклослюдинитовая лента марки ЛС2К-110СТ. Эта лента представляет собой два слоя слюдинитовой бумаги, пропитанной и оклеенной с двух сторон стеклотканью при помощи эпоксидно-полиэфирного компаунда К-110. Эпоксидные и эпоксидно-полиэфирные связующие обладают удовлетворительной коррозийной стойкостью, нагревостойкостью и механической прочностью в отвержденном состоянии. Поэтому они нашли применение в стеклослюдинитовой ленте, предназначенной для изоляции обмоток генераторов высокого напряжения.

Если связующее имеет высокую вязкость, то для обеспечения полной пропитки таким связующим слюдинитовой бумаги его необходимо растворять в каком-либо подходящем растворителе. В этом случае после пропитки слюдяной бумаги необходимо удалить растворитель из связующего, для чего полотно подвергают термосушке в горизонтальных камерах пропиточной машины длиной 9—12 м. Поэтому тенденции в создании термореактивной изоляции высокого напряжения из пропитанных лент базируются на применении в качестве связующих компаундов. При этом компаунд должен обладать сравнительно невысокой вязкостью на стадии изготовления стеклослюдинитовой ленты для обеспечения полной пропитки слюдинитовой бумаги.

В результате поисковых и технологических работ, электрофизических и механических исследований был разработан эпоксидно-полиэфирный состав К-110, отвечающий требованиям, предъявляемым к производству как самой стеклослюдинитовой ленты, так и изоляции.

Характерной особенностью состава К-110 является отсутствие высокой клейкости. Это исключает необходимость проведения при приготовлении процесса сушки, который при использовании других типов связующих проводится для предотвращения слипания ленты в ролик. Отсутствие сушки ленты в сочетании с некоторыми особенностями химического состава компаунда К-110 обеспечивает длительный срок хранения ленты до ее переработки. Обычно ленты, пропитанные составом, содержащим эпоксидные смолы, могут храниться от 2 до 6 мес. Лента на основе состава К-110 фактически сохраняет жизнеспособность в течение 1,5—2,0 лет.

Лента на составе К-110 предназначена для изоляции обмоток высокого напряжения турбогенераторов мощностью до 1000 МВт и напряжением до 24 кВ и состоит из двух сложенных вместе слоев слюдинитовой бумаги толщиной по 40 мкм, склеенных с одной стороны со стеклотканью, а с другой со стеклосеткой. Лента очень эластична и может быть применена для изолирования обмоток, имеющих форму любой сложности. Термореактивная изоляция из этих лент получила название «Высоковольтная электроизоляционная система» (ВЭС). Компаунд в ленте, готовой к намотке, находится в стадии «А», подпрессовку изолированных стержней можно осуществлять без нагрева изоляции (при комнатной температуре). После отверждения изоляция допускала при укладке стержней меньшие деформации, чем МКИ. Поэтому было установлено требование усиления укрепления обмоток в пазу и особенно вне паза. Кроме того, требовалось изменить форму стержней таким образом, чтобы при укладке обмотки в пазы не приходилось деформировать стержни. После проведения дополнительных исследований и накопления опыта рекомендации по применению изоляции ВЭС были распространены на все генераторы, выпускаемые заводом «Электротяжмаш».

Одновременно с началом освоения изоляции ВЭС в производственных условиях проводились усовершенствование изоляции и исследование ее свойств. Усовершенствование изоляции проводилось, в первую очередь по линии технологии ее изготовления. Как уже отмечалось, компаунд К-110 в ленте

ЛС2К-110СТ находится в стадии «А». В связи с этим лента обладает повышенной чувствительностью к сосредоточенным нагрузкам и даже просто нагрузкам высокого уровня.

Оптимальным вариантом опрессовки элементов обмотки, изолированных этой лентой, является гидростатическая опрессовка изоляции при небольшом давлении $[(8 \div 10)10^5 \text{ Н/м}^2]$. Исследования, проведенные на первых стадиях разработки изоляции из лент на основе состава К-110, показали, что гидростатическая опрессовка изоляции повышает ее характеристики, и особенно устойчивость к действию электрического поля.

На основании специальных исследований было установлено, что условия опрессовки изоляции в пресс-формах можно приблизить к условиям гидростатической опрессовки и тем самым повысить характеристики изоляции. Метод такой опрессовки заключается в том, что на изоляцию наносится один или несколько слоев достаточно вязкого компаунда, который при опрессовке в пресс-форме перераспределяется, выравнивая давление на изоляцию и тем самым обеспечивая равномерную ее опрессовку.

В результате устраняется возможность возникновения сосредоточенных давлений и, как следствие этого, опасность повреждения диэлектрического барьера. Необходимый эффект достигается при нанесении одного слоя вязкого компаунда. Этот слой компаунда наносится на поверхность плетеного стержня перед наложением первого слоя ленты.

При наложении изоляции поверхность частей обмотки многих видов оборудования часто промазывается клеящим составом. Это позволяет использовать пресс-формы очень простой конфигурации и обеспечивает выполнение требований техники безопасности. При разработке технологической схемы изготовления изоляции лент, пропитанных составом К-110, были проведены специальные исследования для определения условий получения изоляции достаточной механической и электрической прочности. В работах по выбору оптимальных условий опрессовки изоляции было установлено следующее:

- изоляция из ленты ЛС2К-110СТ, нанесенной в 1/2 нахлеста и опрессованной за один прием, имеет после термообработки под давлением достаточно высокую монолитность и устойчивость к действию напряжения, если усадка при прессовании (т.е. отношение толщины опрессованной изоляции к расчетной толщине изоляции до опрессовки, определенной на основании данных о толщине ленты в состоянии поставки) составляет 7—10 %. Если опрессовка достигает 16—20 %, то это во многих случаях приводит к снижению стойкости изоляции к действию напряжения, по-видимому, вследствие повреждения слюдинитовой бумаги;

- для достижения оптимальной опрессовки ее проводят при удельном давлении $(8 \div 10)10^5 \text{ Н/см}^2$.

При установлении режима термообработки изоляции из ленты ЛС2К-110СТ в качестве критериев были выбраны: значение $\text{tg } \delta$ при номинальном напряжении и температуре 130 °С, монолитность до и после прогрева при 130 °С, предел прочности при растяжении при 20 и 130 °С и содержание растворимого остатка

изоляции. Наилучшие данные для изоляции толщиной 4—6 мм (на одну сторону) были получены при температуре термообработки 150—160 °С в течение 15—16 ч. Этот режим положен в основу промышленной технологии изготовления изоляции из лент ЛС2К-110СТ на заводе «Электротяжмаш».

Исследования проводились для сравнения изоляции с ВЭС микалентной компаундированной изоляцией, по которой накоплен большой опыт эксплуатации, а также с изоляцией ВЭС-1 на основе стекломикаленты и отверждающейся при нагреве эпоксиполиэфирностирольного компаунда.

Полученные при испытаниях данные приведены на рис 8.1—8.4, где можно видеть, что изоляция ВЭС по всем характеристикам превосходит микалентную компаундированную изоляцию и изоляцию ВЭС-1.

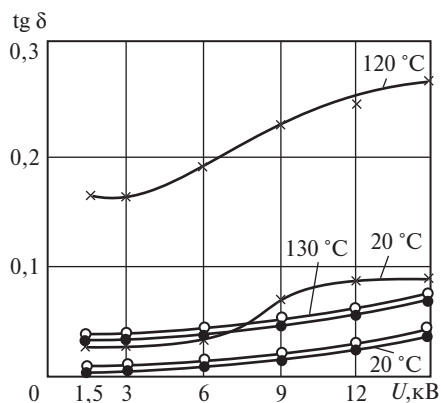


Рис. 8.1. Зависимость $\text{tg } \delta$ различных типов изоляции от напряжения:

● — ВЭС; ○ — ВЭС-1; × — МКИ

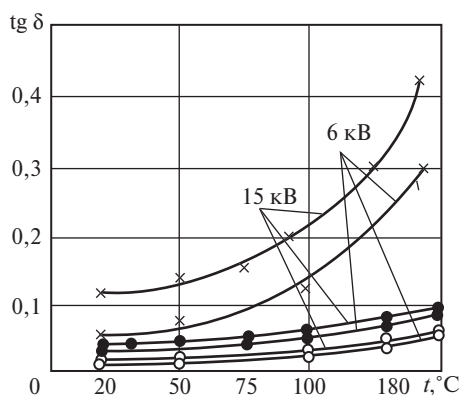


Рис. 8.2. Зависимость $\text{tg } \delta$ различных типов изоляции от температуры:

○ — ВЭС; ● — ВЭС-1; × — МКИ

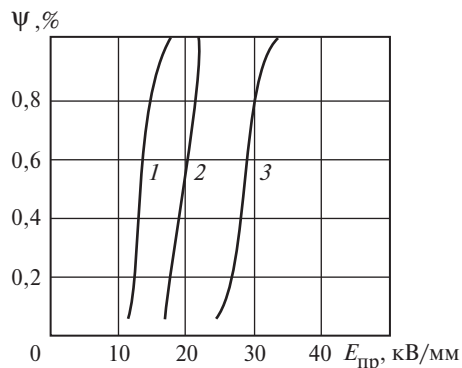


Рис. 8.3. Интегральные кривые распределения значений электрической прочности различных видов изоляции:

1 — МКИ; 2 — ВЭС; 3 — ВЭС-1

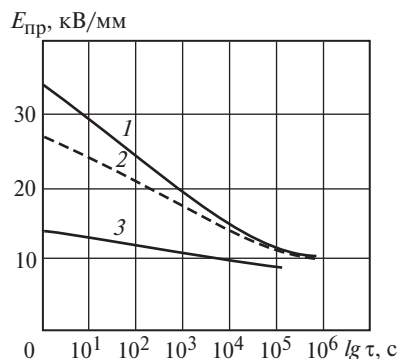


Рис. 8.4. Кривые жизни для различных типов изоляции:

1 — ВЭС; 2 — «Монолит»; 3 — МКИ

Это дало основание применять изоляцию ВЭС в генераторах мощностью до 300 МВт на напряжение 15,75 кВ. При этом учитывалось, что любой тип изоляции на термореактивных связующих, имеющих высокие электрические характеристики, допускает обеспечение надежного склеивания изоляции с проводниками. В этом случае стремятся наносить как можно более тонкий слой клеящего состава. Вязкий компаунд, который рекомендовалось наносить при изолировании лентой ЛС2К-110СТ стержней генераторов, наоборот, должен наноситься достаточно толстым слоем. Эффективность этого приема характеризуется данными табл. 8.1. В таблице приведены сравнительные характеристики изоляции из ЛС2К-110СТ с внесенным под первый слой ее тонким слоем подклеивающего состава и изоляции из ЛС2К-110СТ.

Применительно к капсульным генераторам изоляция должна обладать хорошей влагостойкостью. В этих агрегатах, предназначенных для установки на малых ГЭС, генератор помещается в специальную капсулу, которая располагает-

Таблица 8.1

Характеристики изоляции с демпфирующим слоем

Характеристика	Изоляция из ленты ЛС2К-110СТ	
	с подклеивающим слоем	с демпфирующим слоем
Прирост $\operatorname{tg} \delta$ при испытательном напряжении от $0,5U_{\text{ном}}$ до $1,5U_{\text{ном}}$	0,028—0,041	0,012—0,014
Кратковременная электрическая прочность, кВ/мм:		
в исходном состоянии	22,3—24,5	27,2—30,3
после знакопеременных деформаций с $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. ($5 \cdot 10^5$ циклов)	21,5—23,3	26,5—27,7
после выдержки при температуре 180 °С в течение 100 сут	22,1—25,6	28,4—31,0
после выдержки при температуре 180 °С в течение 100 сут и знакопеременных деформаций с $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. ($5 \cdot 10^5$ циклов)	22,0—24,7	25,7—29,5
Стойкость к длительно приложенному напряжению (время до пробоя, ч) при напряжении 25 кВ, $E = 8,3$ кВ/мм)	611	686
	640	693
	690	750
	980	1100
	1135	1247
	1400	1392
	1869	1990
	2450	2630
	2900	2811
	3595	5017

ется под водой. В капсулу всегда попадает какое-то количество воды, которая испаряется, но конденсируется на внутренних стенках капсулы, имеющих невысокую температуру, близкую к температуре воды в водоеме. В результате внутри капсулы образуется очень высокая относительная влажность. В этих условиях наиболее опасными факторами, которые могут вызвать серьезные нарушения в работе изоляции, являются следующие:

- объемное увлажнение изоляции, которое ведет к снижению объемного сопротивления, к появлению значительных токов утечки и к снижению электрической прочности изоляции;
- увлажнение поверхности изоляции, ведущее к снижению поверхностного сопротивления, увеличению поверхностных токов утечки и появлению поверхностных разрядов, которые оставляют на изоляции проводящие следы (треки);
- нагрев увлажненной изоляции при включении генератора, под действием которого изоляция подсушивается, а электрические характеристики улучшаются, но одновременно постепенно происходит вспухание и расслаивание изоляции, т.е. происходят необратимые изменения.

Для оценки пригодности изоляции ВЭС для применения в капсульных генераторах исследовано поведение изоляции при циклическом воздействии высокой влажности и повышенной температуры. Каждый цикл состоял из двух частей.

Первая часть заключалась в увлажнении в течение 5 сут при температуре 100 °С и относительной влажности с выпадением росы. Каждые сутки температура в течение 8 ч поддерживалась на уровне 40 °С, а в течение последующих 16 ч снижалась до 30—35 °С. Ежедневно на 10 мин к изоляции прикладывалось повышенное напряжение.

Вторая часть цикла включала в себя выдержку макетов при температуре 100 °С в течение 6 ч с последующим охлаждением до комнатной температуры. В течение первых двух часов выдержки при температуре 100 °С к изоляции прикладывалось повышенное напряжение того же уровня, что и в первой части цикла.

После окончания первой и второй частей цикла проводились измерения объемного сопротивления изоляции при напряжении 1000 В и визуальный осмотр макетов.

Испытание состояло из трех этапов, каждый по девять циклов. Этапы различались только значением повышенного напряжения, прикладываемого к изоляции во время увлажнения и во время прогрева при температуре 100 °С. На первом этапе значение напряжения составляло 3,2 кВ, на втором — 6,4 кВ, на третьем — 10 кВ (номинальное напряжение капсульных генераторов 3 кВ).

Испытывалось несколько вариантов изоляции, в том числе изоляция ВЭС-1, изоляция ВЭС, микалентная компаундированная изоляция и стеклобумомикалентная компаундированная изоляция (СБМКИ). Критериями выхода изоляции из строя было снижение ее объемного сопротивления до 10^6 Ом и образование на изоляции проводящих следов разрядов.

Проведенные испытания показали, что среди вариантов изоляции и термореактивных связующих лучше других по влагостойкости и стойкости к поверхностным разрядам оказалась изоляция ВЭС, которая и была принята для приме-

нения в капсульных генераторах. Оба варианта компаундированной изоляции на втором этапе испытаний необратимо теряли монолитность.

Капсульные гидрогенераторы Киевской и Каневской ГЭС были спроектированы на мощность 16,3 МВт. Испытания, проведенные после пуска первых генераторов, показали возможность повышения их мощности до 18,5 МВт. Если принять, что в среднем продолжительность работы капсульных генераторов в течение года составляет 2 тыс. ч, 34 генератора Киевской и Каневской ГЭС выработали дополнительно 1,5 млн МВт · ч электроэнергии.

При изготовлении обмоток высокого напряжения генераторов с изоляцией из стеклослюдинитовых лент производительность труда и оборачиваемость оборудования значительно выше, а затраты ручного труда значительно меньше, чем при изготовлении таких обмоток с микалентной изоляцией. Это обусловлено в первую очередь тем, что вся изоляция из стеклослюдинитовых лент, т.е. все слои, наносится за один прием, в то время как при изготовлении обмоток с микалентной компаундированной изоляцией микалента наносится в несколько приемов (каждый раз не более шести слоев). При этом после нанесения каждой порции микаленты на стержене размещаются защитные ленты, стержень укладывают на раму и помещают в котел. После нанесения каждой партии микаленты стержень проходит полный процесс компаундирования, после чего с него снимаются излишки битума и защитная лента.

Накопленный опыт эксплуатации позволяет сделать заключение о высокой эксплуатационной надежности изоляции ВЭС, которая, по крайней мере, в 2,5 раза выше, чем микалентная компаундированная изоляция.

Некоторые особенности ленты ЛС2К-110СТ (длительный срок хранения, возможность ручной изолировки, несложный технический процесс формирования изоляции, простота технологического оборудования) привлекли к ней внимание ремонтных организаций. Этот вид изоляции применялся для выпуска новых турбогенераторов на заводе «Электротяжмаш». В настоящее время изоляция ВЭС на заводе не применяется, а используется ремонтными предприятиями при ремонте ранее выпущенных генераторов с этой изоляцией.

8.2. Изоляция типа «Слюдотерм» на основе стеклослюдинитовой ленты ЛТСС-3 для турбогенераторов

Лента марки ЛТСС-3 является разновидностью пропитанных стеклослюдинитовых лент, применяемых для изоляции высокого напряжения турбо- и гидрогенераторов большой мощности, включая генераторы для атомных электростанций. Лента состоит из одного слоя слюдинитовой бумаги и подложки (стеклоткани), склеенных термореактивным эпоксидноидитольным составом, который вводится полностью при изготовлении ленты. Применяемая в этом случае слюдинитовая бумага характеризуется определенной степенью пропитываемости и следующими механическими параметрами: толщина 0,035—0,04 мм, плотность 60 г/м², механическая прочность 134 Н/мм². В качестве подложки при изготовлении ленты принята стеклоткань толщиной 0,04 мм, плотность 65 г/м².

Применение такой ткани обеспечивает достаточную механическую прочность ленты, необходимую для натяжения при механизированном наложении.

Поскольку лента выполняется односторонней, содержание слюдинита — основного диэлектрического барьерного материала в изоляции — является достаточным даже при указанной толщине подложки. Существенное влияние на качество стеклослюдинитовой ленты и на стабильность свойств готовой изоляции оказывает качество и стабильность применяемого связующего. При этом наиболее важными характеристиками являются время полимеризации и вязкость лака. Из-за недостаточной стабильности свойств применяемых при изготовлении лака эпоксидных смол была разработана система корректировки времени их полимеризации в течение 3—6 мин при температуре 200 °С. Поэтому лаки, применяемые в производстве, имели строго определенные характеристики, обеспечивающие стабильность качества готовой изоляции.

Стеглослюдинитовая лента ЛТСС-3 изготавливается в рулонах непрерывным способом. Разведенный полярным растворителем (смесь бутанола и толуола) до необходимой вязкости эпоксидноидитольный состав обеспечивает глубокую пропитку и склейку слюдинита со стеклотканью.

Для снижения содержания растворителя (летучих веществ) в пропитанной ленте и интенсификации процесса изготовления пропитанных стеклослюдинитовых лент было внесено изменение в обычно принятую технологию, которое заключается в том, что слюдинитовая бумага раскатывается на пропитанную стеклоткань только после предварительной ее подсушки, а не сразу после пропитки.

Технология изготовления пропитанной стеклослюдинитовой ленты заключается в следующем: стеклоткань с рулона проходит через устройство пропитки лаком и поступает в камеру предварительной подсушки, имеющей вытяжную вентиляцию с воздухом температурой 70—100 °С, обдувающим стеклоткань равномерно по всей ширине. На пропитанную и подсушенную стеклоткань накладывается стеклослюдинитовая бумага. Вся эта композиция поступает в печь при температуре 120—140 °С для сушки со скоростью 0,7 м/мин. Данная технология позволяет получить сухую пропитанную ленту, которая не склеивается в рулоне, без дополнительных раздельных слоев.

Свойства ленты ЛТСС-3

Толщина, мм	0,10 ± 0,02
Электрическая прочность, кВ/мм.....	26,0
Предел прочности при растяжении, Н/м ²	80 · 10 ⁶
Плотность, г/м ²	220—250
Содержание компонентов, %:	
слюдинита	26—40
летучих	1,3—2,5
связующих	40—50
Срок хранения при температуре, сут:	
20 °С.....	60
5 °С.....	180

Процесс изготовления изоляции «Слюдотерм» включает в себя наложение пропитанной стеклослюдинитовой ленты и ее последующую опрессовку и термообработку.

Изоляция «Слюдотерм» на основе пропитанной стеклослюдинитовой ленты ЛТСС-3 применяется в качестве главной корпусной изоляции статорных обмоток турбо- и гидрогенераторов.

Стеклослюдинитовая лента накладывается на стержень статорной обмотки механизированным способом на изолировочном станке. При сматывании с ролика, установленного на изолировочной головке станка, лента проходит через обогреваемый до температуры 100—120 °С валик и в нагретом виде накладывается со скоростью 120 об/мин на стержень с натягом. При нагреве ленты связующее в ней размягчается, лента становится эластичной, что обеспечивает хорошее уплотнение слоев изоляции в процессе наложения, отсутствие складок и морщин. Все слои изоляции накладываются за один прием.

Опрессовка наложенной изоляции «Слюдотерм» может производиться как механическим способом в пресс-формах, так и гидростатическим способом с помощью расплавленного битума. При механическом способе опрессовки изоляции используются переносные пресс-формы для стержней обмотки гидрогенераторов и стационарные прессформы для обмотки турбогенераторов.

Перед механической опрессовкой изолированный стержень прогревается при температуре 120 °С в течение 1 ч для размягчения связующего, затем гидравлическим обжимом создается давление около $25 \cdot 10^5$ Н/м² и начинается процесс термообработки изоляции в течение 10 ч при температуре 160 °С.

Гидростатический способ опрессовки изоляции «Слюдотерм» расплавленным битумом, освоенный в 1975—1980 гг., позволил исключить необходимость изготовления индивидуальных пресс-форм для каждого типа гидрогенератора и увеличить выпуск статорных обмоток гидрогенераторов с этой изоляцией. Вместе с тем при таком способе опрессовки значительно повышается качество и надежность изоляции, поскольку при этом обеспечивается равномерное давление (10^6 Н/м²), стабильная температура термообработки. Благодаря этому с использованием гидростатического способа опрессовки оказалось возможным снизить толщину корпусной изоляции на 20 % по сравнению с микалентной компаундированной.

Изоляция «Слюдотерм» характеризуется высокой механической и электрической прочностью, малым значением тангенса угла диэлектрических потерь, влагостойкостью и маслостойкостью (табл. 8.2).

Результаты исследования показали, что изоляция «Слюдотерм» по электрическим, физико-механическим и тепловым характеристикам значительно превосходит микалентную компаундированную изоляцию. Наряду с повышением надежности применение изоляции «Слюдотерм» позволяет увеличить использование активных материалов, исключает необходимость применения дорогостоящей и дефицитной щепаной слюды. Указанные преимущества обеспечили получение при ее использовании значительного эффекта. Изоляция «Слюдотерм» для обмоток гидро- и турбогенераторов начала применяется на ЛПЭО «Элек-

Таблица 8.2

Характеристики изоляции высокого напряжения «Слюдотерм»

Характеристика?	Тип изоляции	
	«Слюдотерм»	микалентная компаундиро- ванная
Предел прочности при растяжении, 10^6 Н/м ² , при температуре:		
при 20 °С	120	58
при 130 °С	50	5
Предел прочности при сжатии при 20 °С, 10^6 Н/м ²	200	—
Предел прочности при статическом изгибе при 20 °С, 10^6 Н/м ²	280	17
Модуль упругости при изгибе, 10^9 Н/м ² , при температуре:		
при 20 °С	3—4	1—2
при 130 °С	1,0	—
Теплопроводность, Вт/(м · К)	0,27	0,21
КТЛР, 10^6 град. ⁻¹ , при температуре:		
при 20 °С	-11,9	—
при 130 °С	15,7	—
Тангенс угла диэлектрических потерь при 6 кВ, при температуре:		
при 20 °С	0,006	0,02
при 130 °С	0,11	0,35
Диэлектрическая проницаемость, при температуре:		
при 20 °С	4,6	4,5
при 130 °С	5,8	5,5
Удельное объемное сопротивление, Ом · м, при температуре:		
при 20 °С	Более 10^{14}	Более 10^{14}
при 130 °С	$1 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$
Электрическая прочность кратковременная, кВ/мм	25—30	16—21
Длительная электрическая прочность (50 %-ная вероятность) при $E = 10$ кВ/мм, ч	1000	60

тросила» в 1964 г. С изоляцией «Слюдотерм» изготовлены все гидрогенераторы мощностью 100—1200 МВт, выпускаемые ЛПЭО «Электросила». В их числе турбогенератор мощностью 1200 МВт для Костромской ГРЭС, турбогенератор мощностью 1000 МВт для Южно-Украинской атомной электростанции, турбогенераторы ТВВ-500 для Ленинградской и Курской атомных электростанций, ТВВ-800 для Славянской, Запорожской, Углегорской и других электростанций.

С изоляцией «Слюдотерм» выпущены гидрогенераторы мощностью 200—250 МВт для Зейской, Усть-Илимской, Братской ГЭС, а также уникальные гидрогенераторы мощностью 500—640 МВт для Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС.

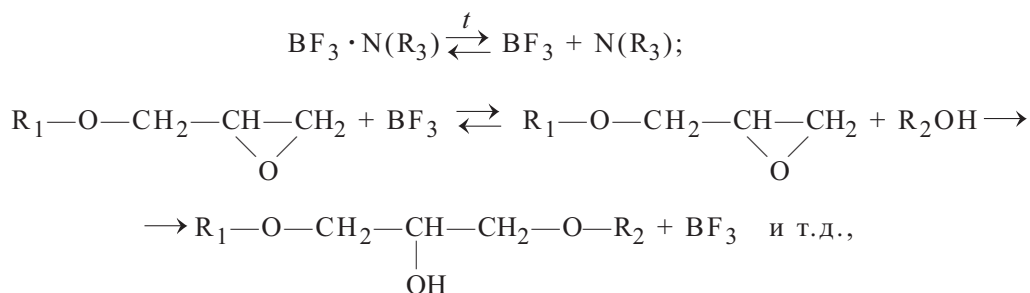
8.3. Изоляция типа «Монотерм»

Возрастающая мощность генераторов требовала улучшения электрических характеристик изоляции. Существующие виды изоляции из пропитанных лент за счет большого содержания связующего (до 50 %) и его значительной вязкости предусматривают предварительную опрессовку изоляции стержней при повышенной температуре и дополнительном давлении. Только после этого проводится герметизация изоляции стержней, загрузка в котел и гидростатическая опрессовка битумом при температуре и давлении. Помимо двухстадийности этот процесс не обеспечивал необходимые геометрические размеры стержней, в результате чего их приходилось калибровать путем срезанных излишков толщины изоляции, что приводило к дополнительной отбраковке готовых стержней.

Поэтому при утонении изоляции стержневых обмоток по такой технологии возникали большие трудности. Требовалась разработка нового связующего для пропитанных лент.

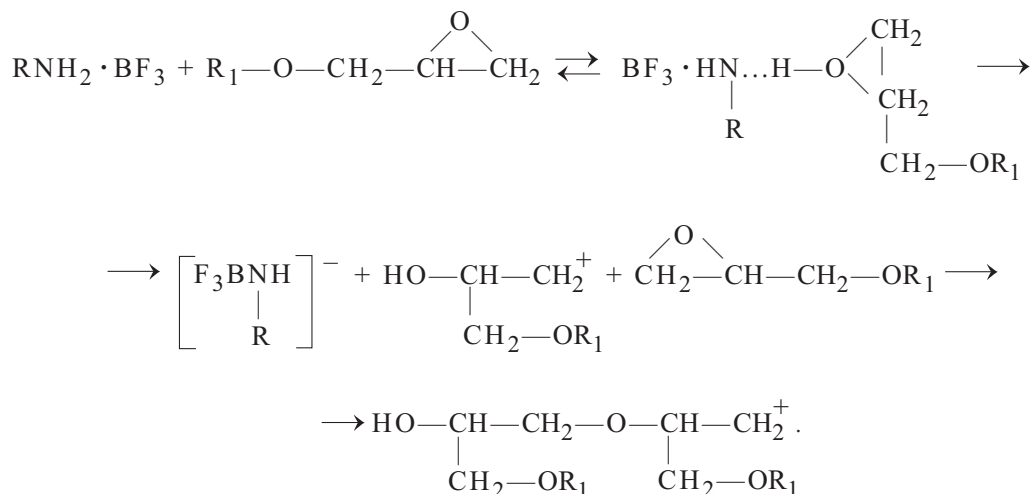
Известно широкое использование различного вида эпоксидных смол в качестве связующих для стеклослюдинитовых лент. В качестве отвердителей в эпоксидных композициях находят применение разнообразные вещества, например ангидриды кислот и их аддукты, амины, комплексные соединения BF_3 с аминами и др.

Отверждение эпоксидных смол в присутствии комплексов трехфтористого бора в основном сводится к сополимеризации эпоксидных и гидроксильных групп. Предложены две схемы реакции. Предполагается, что отвердителем эпоксидной смолы является трехфтористый бор, который образуется вследствие термической диссоциации комплекса на исходные компоненты. Схему реакции представляют следующими уравнениями:



где R_1 и R_2 — олигомерные радикалы эпоксидной смолы.

Ход реакции по другой схеме учитывает действие всего недиссоциирующего комплекса:



Результаты, полученные при изучении скорости изменения удельного объемного сопротивления, показывают, что непосредственной зависимости между активностью комплексов BF_3 и константой ионизации аминов не наблюдается. Таким образом, схема реакции, основанная на том, что отвердителем эпоксидной смолы является недиссоциированный комплекс, активность которого определяется основностью амина, маловероятна.

Активность комплексов BF_3 зависит от природы и качества растворителей, присутствия других веществ, участвующих в реакции. Комплексные соединения трехфтористого бора с аминами позволяют получать быстро отверждающиеся композиции (в частности, при температуре 120—150 °С).

В результате проведенных исследований было разработано связующее, состоящее из эпоксидной смолы, отвердителя, полиэфиракрилата и растворителя. Эпоксидный полимер получен термоотверждением состава, содержащего в качестве эпоксидной смолы полиэфирфункциональную эпоксиноволачную смолу, а в качестве отвердителя — комплекс BF_3 с аминами. Такая композиция за счет применения полифункциональной эпоксиноволачной смолы обеспечивает необходимую вязкость, дающую возможность пропитывать слюдяные бумаги любой толщины, легко перераспределяется при прессовании, поэтому не требует предварительной подпрессовки.

Сочетание полиэфиракрилата и комплекса BF_3 позволит снизить температуру отверждения изоляции до 150—160 °С. В этом случае получается более однородная структура изоляции и сокращается время ее отверждения. Срок хранения таких лент увеличивается до 6 мес. Изоляция обмоток, изготовленных из пропитанных лент с указанным выше связующим, обладает высокими электри-

ческими и механическими характеристиками. Эта разработка получила название «Монотерм».

Пропитанную стеклослюдинитовую ленту ЛСЭК-526-Т изготавливают по обычно принятой технологии, пропитывают эпоксисиловолачным связующим, которое в результате сушки находится в стадии В. Эта лента получила марку ЛСЭК-526-Т. Основные характеристики ленты приведены в табл. 8.3.

Технологический процесс изготовления изоляции типа «Монотерм» может быть кратко представлен в следующем виде. На обмоточно-изолирующем станке на стержни наносится расчетное количество слоев ленты ЛСЭК-526Т в 1/2 нахлеста. Далее стержни помещают в формообразующие планки и герметизируют при помощи защитных лент. Подготовленные стержни укладывают на раму и загружают в котел. Котел закрывается крышкой и вакуумируется при остаточном давлении $(7 \div 10)10^2$ Па в течение 30 мин. Затем котел заполняется разогретым до температуры 150—160 °С битумом, создается давление $(7 \div 8)10^5$ Н и стержни выдерживают в этих условиях 6—8 ч. По окончании пропитки битум сливают, стержни охлаждают, очищают и проводят испытания. Характеристики полученной изоляции стержней «Монотерм» приведены в табл. 8.4.

Разработка такой технологии изготовления изоляции стержневых обмоток генераторов позволила полностью отказаться от предварительной механической подпрессовки изоляции обмоток. А прессование и отверждение гидростатическим способом битумом в котлах обеспечивало необходимые геометрические размеры стержней и исключала необходимость в дополнительной

Таблица 8.3

Основные свойства стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-526-Т

Показатель	Единица измерения	Значение
Толщина	мм	$0,16 \pm 0,02$
Поверхностная плотность	г/м ²	216 ± 15
Содержание слюдяной бумаги	г/м ²	85 ± 5
	%	39
Стеклоткань	г/м ²	45 ± 4
Содержание связующего	г/м ²	86 ± 10
	%	40
Разрывная прочность	10^4 Н/м ²	≥ 140
Текучесть	%	45—70
Электрическая прочность	кВ/мм	≥ 25
Значение $\operatorname{tg} \delta$ при 155 °С	%	≤ 30
Класс нагревостойкости	°С	F (155)

Таблица 8.4

Сравнительные характеристики изоляции «Слюдотерм» и «Монотерм»

Характеристика	Единица измерения	Изоляция	
		«Слюдотерм»	«Монотерм»
Электрическая прочность при ступенчатом подъеме напряжения	кВ/мм	17	21
Значения tg δ при напряжении 9 кВ:	%		
при 20 °С		2	0,5
при 130 °С		14	8,0
Длительная электрическая прочность (пробой 50 % образцов):	ч		
при 15 кВ/мм		48	140
при 12 кВ/мм		250	1470
Срок хранения перерабатываемых лент	мес	1	6

Таблица 8.5

Свойства пропитанных слюдосодержащих лент ведущих фирм

Показатель и материал	Единица измерения	Samicatherm 366.28	Kozebi 630×12-34	Kalmica glass 2005	Элмикатерм 55409
Толщина	мм	0,18 ± 0,02	0,18 ± 0,02	0,18 ± 0,02	0,18 ± 0,02
Поверхностная плотность ленты	г/м ²	265 ± 26	255 ± 25	258 ± 23	247 ± 22
Поверхностная плотность слюдяной бумаги	г/м ²	120 ± 7	120 ± 10	120 ± 5	120 ± 8
	%	45	47	46	48
Поверхностная плотность стеклоткани	г/м ²	32 ± 3	34 ± 4	33 ± 3	38 ± 4
Содержание связующего	г/м ²	113 ± 20	102 ± 15	105 ± 15	89 ± 10
	%	42	40	40	36
Прочность на разрыв	10 ² Н/м	≥ 150	≥ 140	≥ 150	≥ 140
Текучесть	%	≥ 45	55—70	≥ 45	55—70
Класс нагревостойкости		F	F	F	F

калибровке изоляции. Это позволило не только сократить технологические операции и время приготовления изоляции, но и значительно снизить вероятность повреждения основного слюдяного барьера в толще изоляции и тем самым увеличить ее длительную электрическую прочность. По данным «Электросила», значения электрической прочности натуральных стержней генераторов повысились на 15—20 %, и при этом снизилась доля брака при испытаниях в 3—5 раз.

Разработанная технология изготовления изоляции с последующей модернизацией применяется в настоящее время на двух крупнейших заводах АО «Электросила» и «Электротяжмаш», выпускающих обмотки крупных гидро- и турбогенераторов с изоляцией из пропитанных лент.

В табл. 8.5 приведены сравнительные свойства предварительно пропитанных слюдосодержащих лент ведущих мировых фирм.

8.4. Изоляция типа «Термолит»

Основным компонентом современной системы изоляции, особенно для тяговых электрических машин, является пропиточный компаунд. При этом он рассматривается не только как состав, предназначенный для пропитки, но и как связующее всех основных элементов в обмотках электрических машин. Все электроизоляционные материалы должны быть пропитаны составом, имеющим одну химическую природу, и поэтому время отверждения всей композиции и ее отдельных элементов должно быть одинаково. Такое комплексное использование электроизоляционных материалов в системах изоляции ведет к существенному сокращению технологического времени изготовления и снижению энергосресурсов.

С конца 90-х годов прошлого столетия и по настоящее время основным пропиточным составом являлся компаунд на основе диановой смолы ЭД-22 и изометилтетрагидрофталевого ангидрида (ИЗМТГФА), взятых в массовом соотношении 100:80 (компаунд ПК-11), а также нагревостойкие кремнийорганические пропиточные лаки, которые широко применялись в системах изоляции классов Н и С для тяговых электродвигателей, машин постоянного тока, электрических машин морского исполнения т.п.

С учетом возросших требований электромашиностроителей было разработано новое поколение пропиточных полиэфиримидных компаундов, содержащих в качестве активных разбавителей широко известные и доступные олигоэфиракрилаты. Несмотря на то что обычно олигоэфиракрилаты не образуют термостойкие полимеры, их сочетание с олигоэфир(изоцианурат)-имидами и использование специальных технологий позволили создать компаунды с уникальным набором свойств. Эти компаунды не содержат органические растворители стирол или винилтолуол, изоцианаты, циановые эфиры и другие летучие и токсичные компоненты. Полностью отвечая всем современным требованиям, компаунды пожаро- и взрывобезопасны, нетоксичны и не загрязняют окружающую среду. Во всем диапазоне рабочих вязкостей они обладают отличной пропитывающей способностью и хорошо удерживаются в обмотках после пропитки и в процессе отверждения. Малое вытекание обусловлено тем, что они относятся к так называемым структурно-вязким пропиточным составам и имеют небольшое время желатинизации. Компаунды характеризуются полным отсутствием отлипа, в отвержденном состоянии они тропико-, дуго-, трекинго- и радиационностойки.

На предприятии ЗАО «Электроизолит» были разработаны пропиточные компаунды:

- «Элпласт-155ИД», класс нагревостойкости F;
- «Элпласт-180ИД», класс нагревостойкости H;
- «Элпласт-220ИД», класс нагревостойкости C.

Характеристики этих компаундов приведены в табл. 8.6.

Полученные компаунды прошли всесторонние исследования в лабораториях, институтах и на предприятиях. Одним из важнейших технологических параметров для пропиточного компаунда является его жизнеспособность при температурах пропитки и сохранении необходимой для пропитки вязкости.

В качестве базового сравнительного варианта были взяты результаты исследования компаунда ПК-11 — обычного и модифицированного (для увеличения жизнеспособности). Для испытаний были взяты по 1 кг компаундов «Элпласт-155ИД» и «Элпласт-180ИД». Компаунды постоянно находились в термостате при темпе-

Таблица 8.6

Характеристики новых пропиточных компаундов

Техническая характеристика	Марка компаунда (состав без растворителей)		
	«Элпласт-155ИД»	«Элпласт-180ИД»	«Элпласт-220ИД»
Вязкость по ВЗ-246, с (диаметр сопла 4 мм)	40—100 при 20 °С	20—40 при 50 °С	20—40 при 50 °С
Время желатинизации, мин, не более	5 при 130 °С	10 при 150 °С	10 при 150 °С
Срок жизни с введенным отвердителем, сут, не менее	14 при 15—35 °С	5 при 70 °С	14 при 50 °С
Гарантийный срок хранения, мес, не менее	6	12	6
Цементирующая способность при 20 °С, Н	300	392	400
Электрическая прочность (на образцах толщиной 1 мм) при температуре 15—35 °С, МВ/м, не менее	22	25	25
То же после выдержки в течение 24 ч при температуре 23 °С в атмосфере с относительной влажностью 93 %, МВ/м, не менее	20	20	20
Удельное объемное электрическое сопротивление при температуре 15—35 °С, Ом · м, не менее	10^{12}	10^{13}	10^{13}
То же после выдержки в течение 24 ч при 23 °С в атмосфере с относительной влажностью 93 %, Ом · м, не менее	10^{11}	$5 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{11}$

ратуре 50 °С. Ежедневно измерялась вязкость на вискозиметре ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм.

Испытания проводились с постоянным составом компаундов, а также с ежедневным 5 %-ным обновлением. Из емкости с 1 кг каждого вида компаунда отбиралось 50 г и взамен добавлялось 50 г свежеприготовленного компаунда. Результаты испытаний приведены на рис. 8.5 и 8.6.

Как видно из приведенных результатов, компаунды «Элпласт-155ИД» и «Элпласт-180ИД» имеют длительный срок жизни, сохраняя при этом достаточно низкую вязкость, пригодную для пропитки. Эти данные были подтверждены испытаниями компаунда «Элпласт-180ИД» в ОАО «Динамо». Определя-

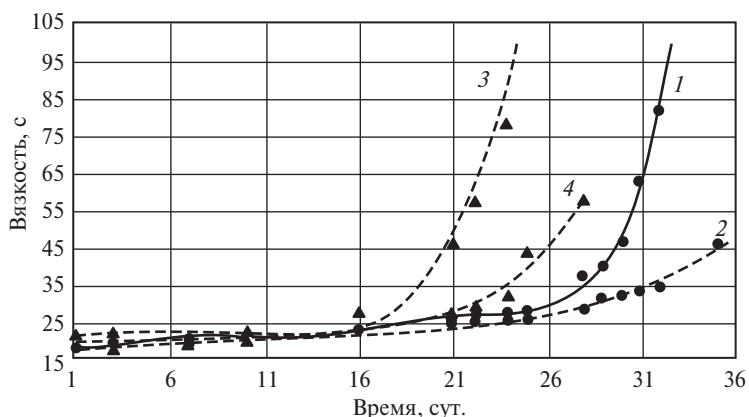


Рис. 8.5. Зависимость вязкости компаундов ПК-11 и «Элпласт-155ИД» при температуре 50 °С (по ВЗ-246) с введенным отвердителем от времени хранения при 50 °С:

1 — «Элпласт-155ИД» без обновления; 2 — «Элпласт-155ИД» с обновлением; 3 — ПК-11 немодифицированный; 4 — ПК-11 модифицированный

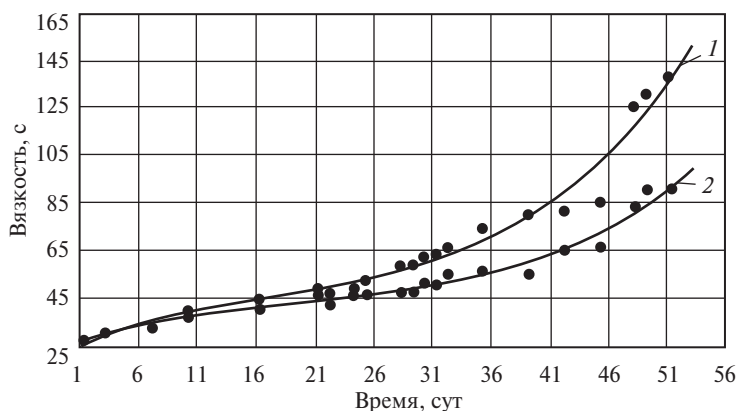


Рис. 8.6. Зависимость вязкости компаунда «Элпласт-180ИД» при 50 °С (ВЗ-246) с введенным отвердителем от времени хранения при 50 °С:

1 — без обновления; 2 — с обновлением

Таблица 8.7

Наращение вязкости компаунда «Элпласт-180ИД» при температуре 35 °С

Время выдержки при температуре 35 °С, сут	Вязкость, с, при температуре	
	20 °С	35 °С
0	282	118
10	282	118
30	318	140
60	437	180

лось нарастание вязкости в условиях хранения компаунда при температуре 35 °С. Испытания проводились согласно требованиям ГОСТ 8420, вязкость определялась через 10, 30, 60 сут вискозиметром ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм. Результаты приведены в табл. 8.7.

Аналогичные испытания были проведены на компаунде «Элпласт-220ИД». На рис. 8.7 представлена зависимость вязкости компаунда «Элпласт-220ИД» от времени хранения при температуре 50 °С.

Дальнейшие исследования и применение этих компаундов на заводах ОАО «Электросила», «Электротяжмаш» показали их высокую жизнеспособность.

Зависимость потери массы компаундов «Элпласт-155ИД» и «Элпласт-180ИД» определялась на дисках диаметром 100 мм и толщиной 1 мм в процессе изотермического термостарения при температуре 180, 200 и 220 °С в течение 15 сут (нормализация образцов проводилась в течение 48 ч по ГОСТ 27710). Результаты испытаний приведены на рис. 8.8, 8.9. На рис. 8.10 приведена кривая изменения массы образцов компаундов при нагревании.

Проведенные исследования показывают высокую нагревостойкость разработанных компаундов. Подтверждение этих данных приведено в табл. 8.8 по результатам испытаний, проведенных ОАО «Динамо».

Исследования цементирующей способности разработанных компаундов также показали их высокие механические характеристики. В соответствии с

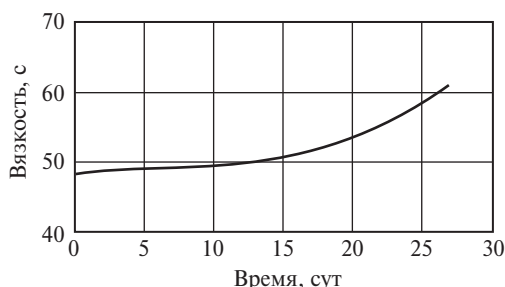


Рис. 8.7. Зависимость вязкости компаунда «Элпласт-220ИД» от времени хранения при температуре 50 °С

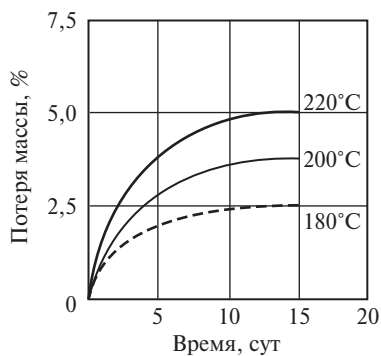


Рис. 8.8. Зависимость потери массы компаунда «Элпласт-155ИД» от времени в процессе изотермического старения

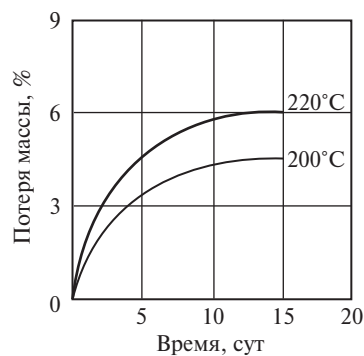


Рис. 8.9. Зависимость потери массы компаунда «Элпласт-180ИД» от времени в процессе изотермического старения

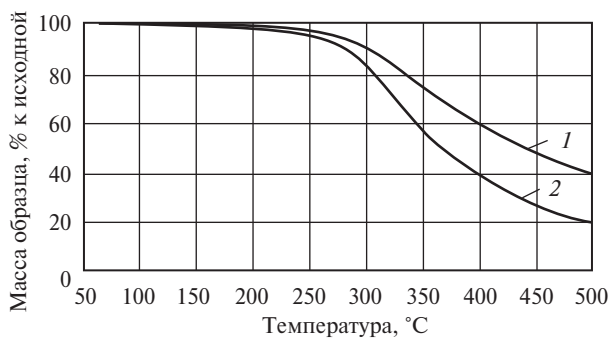


Рис. 8.10. Кривые изменения массы образцов компаундов при нагревании: 1 — «Элпласт-220ИД»; 2 — «Элпласт-180ИД»

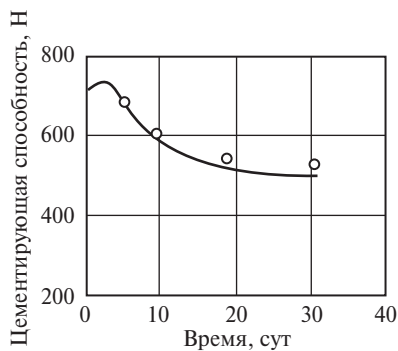


Рис. 8.11. Зависимость цементирующей способности компаунда «Элпласт-180ИД» от времени изотермического старения при температуре 230 °C

Таблица 8.8

Потеря массы компаунда «Элпласт-180ИД», %, при температуре 200 и 220 °С

Время проведения испытаний, ч	Температура, °С	
	200	220
24	1,54	5,85
48	2,48	7,35
72	2,98	8,36
144	3,97	10,24
192	4,52	11,24
240	5,01	11,66
312	5,51	12,38
408	6,17	13,62
480	6,60	14,29
528	6,84	14,79
631	7,33	15,75
799	7,82	—
967	8,43	—

Таблица 8.9

Результаты испытаний компаундов на цементирующую способность

Марка компаунда	Температура, °С	Цементирующая способность, Н					
		1-й образец	2-й образец	3-й образец	4-й образец	5-й образец	Среднее значение
«Элпласт-155ИД»	20	70	60	60	40	70	60
	155	15	15	10	10	15	13
«Элпласт-180ИД»	20	250	100	60	100	100	122
	180°С	15	15	15	10	12	13,4

ГОСТ 27710 была определена нагревостойкость компаунда «Элпласт-180ИД» по показателю «цементирующая способность». За критерий конечной точки было принято снижение показателя на 50 % исходного (рис. 8.11). Изотермическое старение проводилось при температуре 210, 230 и 250 °С на спиральных катушках из алюминиевой проволоки А-16 диаметром 1,7 мм. Диапазон нагревостойкости при коэффициенте вариации 1,1 % составил 195, 216, 214 °С.

В табл. 8.9 приведены показатели цементирующей способности компаундов «Элпласт-155ИД» и «Элпласт-180ИД», определенной на спиральных катушках при комнатной температуре и температуре класса нагревостойкости F и H .

В табл. 8.10 приведены показатели цементирующей способности компаунда «Элпласт-180ИД», полученные ОАО «Динамо». Цементирующая способность определялась по ГОСТ 13525 на разрывной машине на пучке проводов марки

ПСДК после однократной пропитки и отверждения в исходном состоянии и после старения образцов при температуре 220 °С в течение 10 сут. За результат принималось среднее из пяти значений. Также проведена проверка совместимости компаунда «Элпласт-180ИД» с эмаль-изоляцией провода ПЭТД-180 (ТУ16-705-263—82) путем испытания механической прочности на истирание после выдержки провода в компаунде в течение 0; 0,5; 1,0 ч.

Испытания проводились по ГОСТ 14340.10. Отрезки провода помещались в компаунд на указанное выше время, извлекались, протирались марлей и подвергались испытанию на истирание иглой диаметром 0,4 мм под нагрузкой согласно требованиям ТУ 16-705-264—82. Результаты испытаний приведены в табл. 8.11.

Для определения термостойкости компаунда «Элпласт-220ИД» был проведен анализ зависимостей потери массы от температуры образцов в сравнении с компаундом «Элпласт-180ИД» (рис. 8.12).

Таблица 8.10

Результаты определения цементирующей способности компаунда «Элпласт-180ИД»

Состояние компаунда	Цементирующая способность, Н		Вывод о соответствии
	Требования ТУ 05758799.036—99ТУ	Фактически	
Исходное	392, не менее	428	Соответствует
После старения при температуре 220 °С в течение 10 сут	—	221	

Таблица 8.11

Результаты испытания изоляции провода на механическую прочность истиранием

Состояние провода	Среднее число возвратно-поступательных ходов иглы
Исходное	306
После выдержки в компаунде в течение 30 мин	570
После выдержки в компаунде в течение 60 мин	656

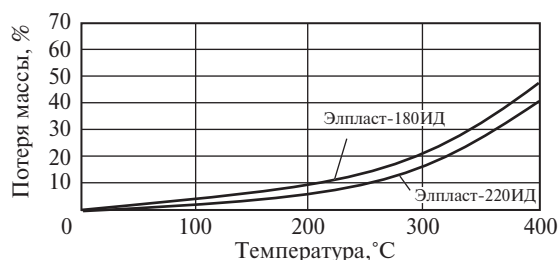


Рис. 8.12. Зависимость потери массы компаундов ЭЛПЛАСТ от температуры

Приведенные данные свидетельствуют о более высокой термостойкости компаунда «Элпласт-220ИД» по сравнению с «Элпласт-180ИД». Так потеря массы компаундов «Элпласт-180ИД» и «Элпласт-220ИД» при нагревании до 400 °С со скоростью 10 °С/мин для двух параллельных образцов составила 46,9; 47,5 % и 38,1; 42,9 % соответственно.

Цементирующая способность компаунда «Элпласт-220ИД» после теплового старения (табл. 8.12) остается на достаточно на высоком уровне.

На «Электротяжмаш» была определена адгезия при сдвиге пар материалов, используемых в пазу якоря, склеенных компаундом «Элпласт-220ИД». Испытания проводили как в исходном состоянии, так и после термостарения. Полученные данные представлены в табл. 8.13.

Из представленных данных видно, что адгезия практически не изменяется после термического старения, а адгезия пленкостеклоткани по отношению к стали и стеклоленте довольно высокая.

Также были проведены циклические испытания компаунда «Элпласт-220ИД» при температурах 250 и 260 °С. Испытания проводили на дисках, подготовленных согласно методам испытаний по определению электрической прочности. После каждого цикла определялись потеря массы, тангенс угла диэлектрических потерь и сопротивление образца. Продолжительность одного цикла для образцов при температуре 250 °С составляла 4 сут, при температуре 260 °С — 2 сут. Данные о потере массы образцов компаунда «Элпласт-220ИД» в процессе изотермического старения в течение 10 циклов при температуре 250 °С представлены на рис. 8.13 и при температуре 260 °С — на рис. 8.14.

Таблица 8.12

Цементирующая способность компаунда «Элпласт-220ИД»

Цементирующая способность в исходном состоянии, 10 ⁴ Н	Цементирующая способность после теплового старения при температуре								
	200 °С			220 °С			240 °С		
	10 сут	30 сут	40 сут	10 сут	30 сут	40 сут	10 сут	30 сут	40 сут
70	63,0	54,6	63,0	62,0	60,3	60,6	60,0	50,6	20,3

Таблица 8.13

Адгезия пары материалов, склеенных компаундом «Элпласт-220ИД»

Склеиваемые материалы	В исходном состоянии, Н	После старения в течение 164 ч при температуре 220 °С, Н
Медь—пленка полиимидная (ПИМ)	19,5	18,5
Пленка ПИМ—пленка ПИМ	15,9	16,8
Пленка ПИМ—стеклоткань	16,4	14,3
Стеклоткань—пленкостеклоткань	50,0	48,0
Пленкостеклоткань—сталь	78,4	75,0

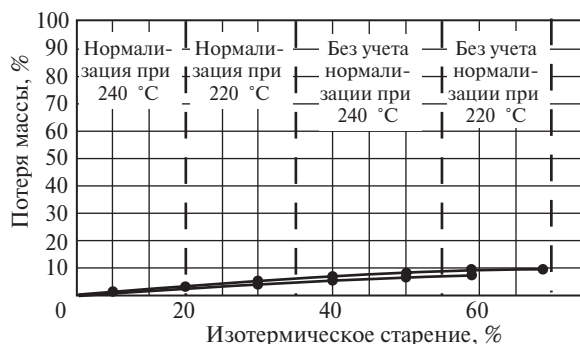


Рис. 8.13. Изотермическое старение компаунда «Элпласт-220ИД» при температуре 250 °С

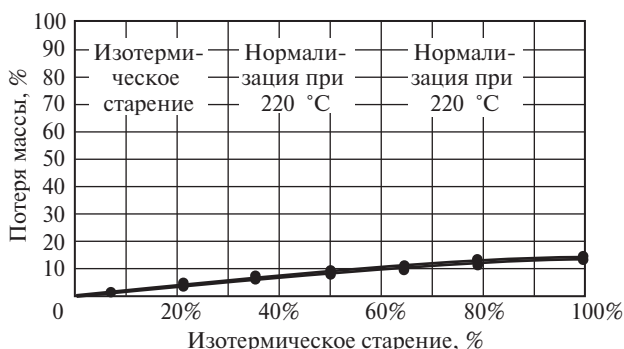


Рис. 8.14. Изотермическое старение компаунда «Элпласт-220ИД» при температуре 260 °С

Таблица 8.14

Тангенс угла диэлектрических потерь и сопротивление компаунда «Элпласт-220ИД» во время циклических испытаний при напряжении 1,8 кВ

Номер цикла	Тангенс угла диэлектрических потерь, %, при температуре, °С					Сопротивление, Ом
	20	100	120	150	180	
Нормализация	0,60	0,70	0,75	0,80	1,20	$5 \cdot 10^{12}$
I	0,54	0,85	1,60	4,00	6,10	
II	0,30	0,80	1,80	3,43	4,93	$8,5 \cdot 10^{13}$
VI	0,63	0,84	0,92	1,10	2,10	
X	0,60	0,80	0,98	1,28	3,08	$8 \cdot 10^{15}$

Из представленных данных видно, что тангенс угла диэлектрических потерь не превышает 10 % при температуре 180 °С и практически не изменяется во время циклического старения. Сопротивление возрастает более чем в 15 раз. Это объясняется тем, что во время термического старения происходит полная полимеризация компаунда.

Одной из отличительных характеристик разработанных компаундов, является короткое время желатинизации в толстом слое (менее 30 мин при температуре больше 130 °С) и непродолжительное время отверждения.

Так, для компаунда «Элпласт-155ИД» это время составляет 6—10 ч при температуре 155 ± 5 °С, для «Элпласт-180ИД» оно составляет 6—10 ч при температуре 180 ± 5 °С, а для «Элпласт-220ИД» это время составляет 6—10 ч при температуре 200 ± 5 °С.

Однако применение этих компаундов для пропитки изоляции из существующих пропитанных лент (ЛСПЭ-934, ЛСК-110, ЛСЭК-5 и др.) требовало, за счет пропитывающих составов этих лент, термообработку в 2—3 раза большего времени, чем было необходимо для термообработки компаундов «Элпласт». Поэтому были разработаны специальная технология и соответствующее технологическое оборудование, позволяющее изготавливать пропитанные ленты с применением в качестве связующего компаунда «Элпласт» без растворителя.

Использование компаунда для изготовления лент и последующей пропитки изолированной обмотки имеет следующие преимущества перед традиционными видами изоляции:

- лента сохраняет эластичность в течение гарантийного срока хранения (1 год);
- связующее в ленте обладает способностью к повышенной текучести при пропитке под давлением;
- отпадает необходимость термообработки (сушки) обмоток перед пропиткой;
- сокращает в 3—4 раза процесс отверждения изоляции;
- обеспечивает дополнительную пропитку витковой изоляции.

Для изоляции класса нагревостойкости F была разработана лента «Элизтерм-155», для класса нагревостойкости H — лента «Элизтерм-180», а для класса нагревостойкости C — лента «Элизтерм-220», где в качестве связующего применяется соответствующий классу нагревостойкости компаунд «Элпласт».

В табл. 8.15 приведены конструкции и основные характеристики пропитанных лент «Элизтерм».

Для вакуум-нагнетательной пропитки помимо используемых традиционно сухих лент были разработаны полупропитанные ленты «Элпор» с содержанием связующего до 13 %. Эти ленты более технологичны при механизированной изолировке обмоток, позволяет значительно снизить пыление и повысить качество склейки слюдинитовой бумаги с подложками. Также как и в лентах «Элизтерм», в качестве связующего применяются компаунды «Элпласт». Для лент «Элпор-155» и «Элпор-180» применяется компаунд «Элпласт-180ИД», для лент «Элпор-220» — «Элпласт-220ИД».

Применение для лент «Элизтерм-155-ТПл» и «Элпор-Пл» компаунда «Элпласт-180ИД» обусловлено обеспечением гарантии класса нагревостойкости F изоляции на основе ПЭТФ-пленки.

Таким образом, удалось обеспечить технологию изготовления систем изоляции обмоток электрических машин, в которых пропитывающий компаунд одно-

Таблица 8.15

Основные характеристики лент «Элизтерм» толщиной 0,08—0,13 мм

Марка	Массовая доля компонентов, %		Вид подложки	Пробивное напряжение, кВ, не менее	Удельная разрушающая нагрузка при растяжении, 10^2 Н/м, не менее	Класс нагревостойкости
	слоиститовой бумаги, не менее	связующего вещества				
«Элизтерм-155ТПл»	30	«Эпласт-180ИД» 25—30	Стеклоткань, ПЭТФ-пленка	4,0	70—150	F
«Элизтерм-155ТТ»	30	«Эпласт-180ИД» 25—30	Стеклоткань, стеклоткань	1,2	100—240	F
«Элизтерм-180ТПМ»	30	«Эпласт-180ИД» 25—30	Стеклоткань, полиимидная пленка	5,0	90—150	H
«Элизтерм-180ТТ»	30	«Эпласт-180ИД» 25—30	Стеклоткань, стеклоткань	1,2	100—240	H
«Элизтерм-220ТПМ»	30	«Эпласт-220ИД» 25—30	Стеклоткань, полиимидная пленка	5,0	90—150	C
«Элизтерм-220ТТ»	30	«Эпласт-220ИД» 25—30	Стеклоткань, стеклоткань	1,2	100—240	C

временно применялся в качестве связующего в пропитанных и полупропитанных стеклослюдосодержащих лентах. Такая система изоляции получила название «Термолит», а в соответствии с классом нагревостойкости — «Термолит F», «Термолит H» и «Термолит C».

Для определения технологических параметров изготовления изоляции были проведены исследования времени полимеризации компаундов в пропитанных лентах. На рис. 8.15 приведены данные о времени полимеризации связующего в ленте «Элизтерм-180ТПМ» при различных температурах отверждения. Полученные данные показывают, что полное отверждение связующего при температуре 180 °С происходит в течение 6—10 ч. Также были проведены сравнительные исследования по определению текучести лент «Элизтерм» и ЛСЭК-5 в стадии поставки и после 1 года и 6 мес хранения в зависимости от давления и температуры. Текучесть связующего определялась по ГОСТ 26103. Приведенные на рис. 8.16 и 8.17 результаты этих исследований показали, что связующее в ленте «Элизтерм» обладает хорошей текучестью при температурах пропитки 50—80 °С и давлении $(2\div 6)10^5$ Н/м². Это, в свою очередь, обеспечивает значительное повышение пробивных напряжений корпусной и витковой изоляции.

Принципиальное отличие разработанной ЗАО «Электроизолит» изоляции «Термолит» от всех традиционно применяемых в том, что обмотки перед пропиткой не подвергаются термообработке, а только нагреваются до температуры 50—70 °С. В качестве связующего в ленте используется тот же компаунд, которым затем может пропитываться обмотка. При этом связующее в ленте обладает текучестью, обеспечивающей его перемещение для заполнения пустот и допропитку витковой изоляции при вакуум-нагнетательной пропитке.

На рис. 8.18 приведены сравнительные значения пробивного напряжения, полученные на макетах обмоток якорей тяговых электродвигателей, изготовленных по традиционной технологии и технологии «Термолит». Использование

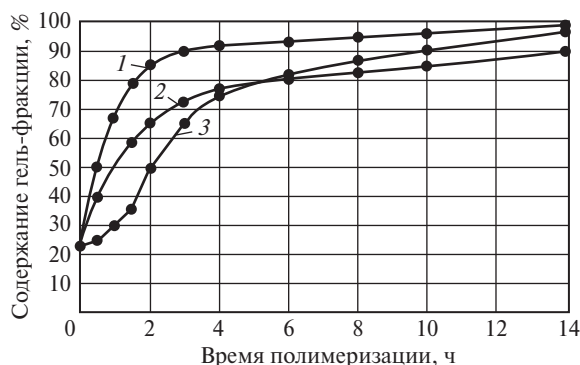


Рис. 8.15. Время полимеризации связующего в ленте «Элизтерм-180ТПМ» при различных условиях термостарения:

1 — при 180 °С; 2 — при 160 °С; 3 — при ступенчатом нагреве (130 °С — 2 ч, 160 °С — 4 ч, 180 °С — 6 ч)

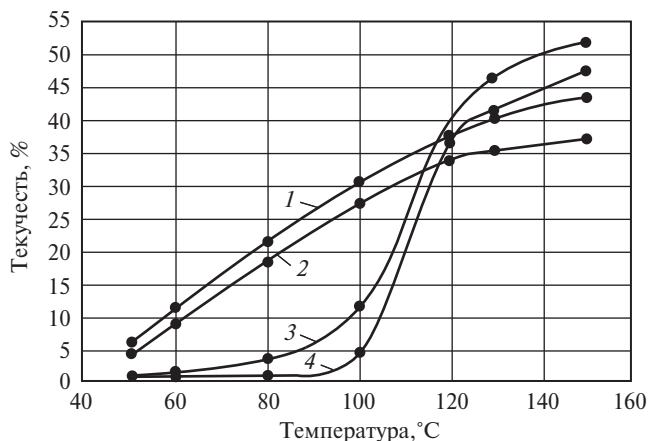


Рис. 8.16. Зависимость текучести связующего из пропитанной слюдинитовой ленты при опрессовке в течение 5 мин от температуры:

1 — лента «Элизтерм» ($6 \cdot 10^4$ Па); 2 — лента «Элизтерм» ($2 \cdot 10^4$ Па); 3 — лента «ЛСЭК-5» ($6 \cdot 10^4$ Па); 4 — лента «ЛСЭК-5» ($2 \cdot 10^4$ Па)

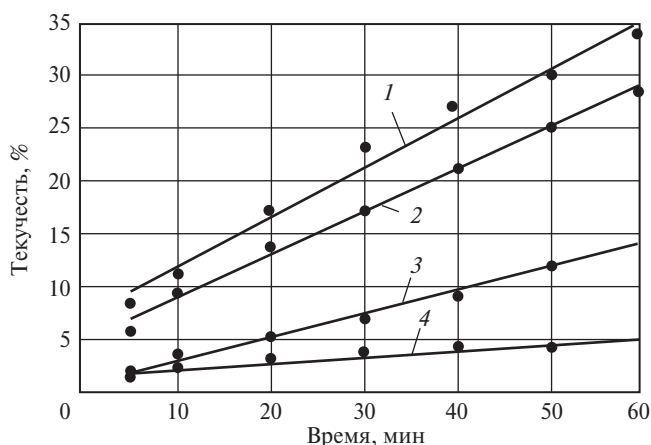


Рис. 8.17. Зависимость текучести связующего из пропитанной слюдинитовой ленты при давлении $6 \cdot 10^4$ Па и температуре 50 °C от времени опрессовки:

1 — лента «Элизтерм» (свежеизготовленная); 2 — лента «Элизтерм» (после года хранения); 3 — лента «ЛСЭК-5» (свежеизготовленная); 4 — лента «ЛСЭК-5» (после 6 мес хранения)

технологии «Термолит» позволяет увеличить пробивное напряжение корпусной изоляции от 28 до 33 кВ.

Аналогично исследован процесс пропитки витковой изоляции. На моделях якорных катушек, выполненных из провода ПЭТВСД сечением $3,55 \times 7,1$ мм, определялись пробивные напряжения между витками до и после пропитки по технологии «Термолит». В качестве корпусной изоляции использовали ленту «Элизтерм-180ТПМ». Со стороны выводных концов обмотки заливали компаун-

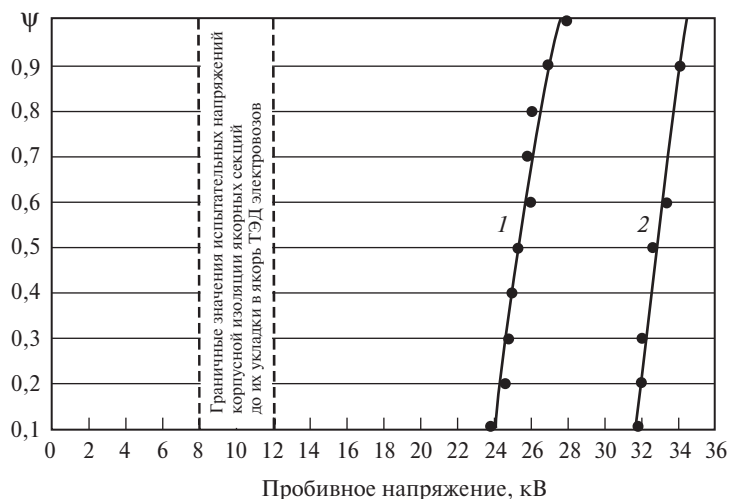


Рис. 8.18. Значения пробивного напряжения, полученные на макетах, изолированных лентами (четыре слоя в 1/2 ширины) «Элизтерм-155ТПл» толщиной 0,1 мм:

1 — традиционная технология; 2 — технология «Термолит»

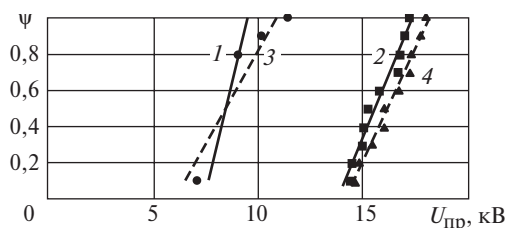


Рис. 8.19. Сравнительные значения пробивного напряжения между витками провода ПЭТВСД:

1 — непропитанный провод ПЭТВСД; 2 — пропитка по технологии «Термолит» (корпусная изоляция — пять слоев стеклослюдинитовой ленты «Элизтерм-180ТПМ»); 3 — непропитанный провод ПЭТВСД; 4 — пропитка по технологии «Монолит-2»

дом холодного отверждения и отверждали (для исключения пропитки вдоль проводников). На рис. 8.19 приведены значения пробивных напряжений между проводниками провода ПЭТВСД до пропитки (кривая 1) и после пропитки (кривая 2). Для сравнения на рисунке приведены данные аналогичных испытаний по технологии «Монолит-2» (кривые 3 и 4).

Полученные данные показывают, что использование технологии «Термолит», так же как и «Монолит-2», обеспечивает увеличение пробивных напряжений между витками в среднем почти в 2 раза. Различие заключалось в том, что при испытании изоляции, изготовленной по технологии «Монолит-2», корпусная изоляция состояла из сухой ленты ЛСКН-160ТТ и пропитка витковой изоляции осуществлялась непосредственно пропиточным компаундом ПК-11 через пористую изоляцию. При использовании технологии «Термолит» эта пропитка осуществляется за счет связующего в ленте в процессе гидростатической опрес-

совки изоляции во время вакуум-нагнетательной пропитки. Подтверждением этого эффекта является увеличение пробивного напряжения из-за повышения содержания связующего в витковой изоляции примерно в 1,5 раза, определенного после испытаний методом привеса после выжигания связующего витковой изоляции в муфеле.

Одним из важнейших свойств полиэфирных компаундов является короткое время желатинизации в толстом слое (10—15 мин при температуре 130 °С) по сравнению с эпоксидным компаундом ПК-11 (при температуре 150 °С в течение 4—5 ч). Короткое время желатинизации обеспечивает качественную пропитку и минимизирует вытекание компаунда из изоляции при последующей термообработке. Технология «Термолит» характеризуется самыми короткими процессами пропитки и термообработки обмоток.

На рис. 8.20 представлены режимы сушки, пропитки, термообработки при использовании пропиточного компаунда «Элпласт-155ИД» и пропиточного лака ФЛ-98.

Как видно из представленных данных технологический процесс сокращается от 38 до 9 ч при применении технологии «Термолит F». На рис. 8.21 представлены временные режимы технологии «Термолит F» по сравнению с временными режимами технологии пропитки компаунда ВЗТ-1. Процесс сокращается более чем в 5 раз.

На рис. 8.22 представлены режимы пропитки по технологии «Термолит Н» в сравнении с кремнийорганическим лаком КО-916. Процесс пропитки сокращается в 2 раза.

В табл. 8.16 представлены данные о продолжительности изготовления изоляции обмоток по технологии «Термолит» по сравнению с серийными технологиями пропитки эпоксидным компаундами «Монолит-2» и кремнийорганиче-

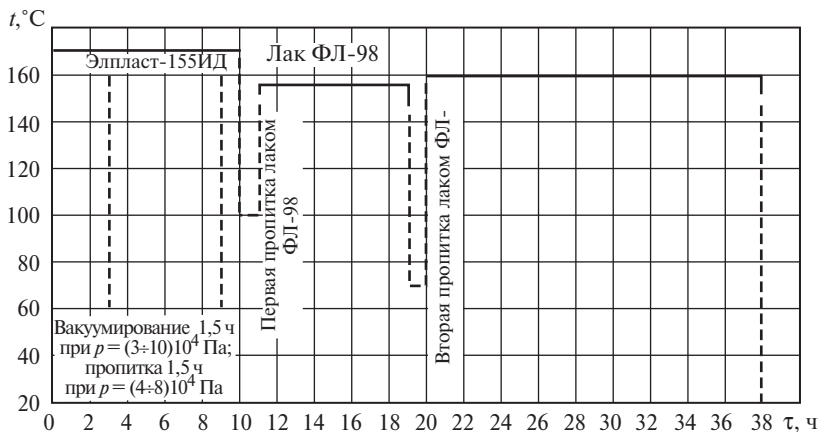


Рис. 8.20. Режимы сушки, пропитки, термообработки пропиточного компаунда «Элпласт-155ИД» и серийного пропиточного лака ФЛ-98

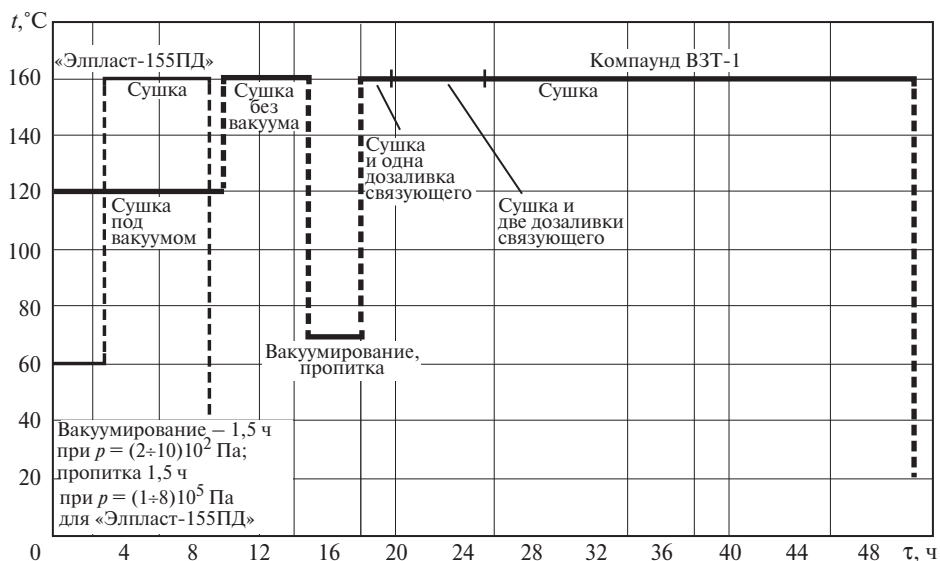


Рис. 8.21. Режимы сушки, пропитки, сушки обмотки якоря двигателя НБ-514 компаундом ВЗТ-1

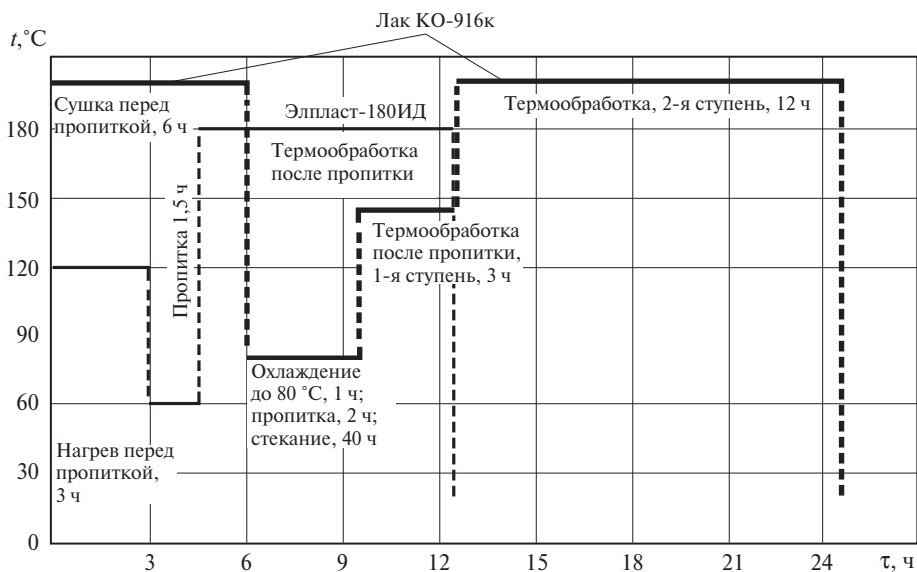


Рис. 8.22. Диаграмма пропиточно-сушильного цикла при изготовлении якорей ТЭД с электрической изоляцией класса нагревостойкости Н

Таблица 8.16

Технологические режимы сушки, пропитки и термообработки узлов тяговых электродвигателей

Тип изоляции	Нагрев до температуры, °C	Сушка, °C/ч	Охлаждение, °C/час	Вакуумирование, ч	Пропитка, ч	Термообработка, °C/ч	Общее время, ч
Изоляция «Термолит», пропитка в компаунде «Эпласт-180ИД»	50—70	—	—	1	1—2	180/(6—10)	8—12
Изоляция «Монолит-2», пропитка в компаунде ПК-11	100—150	150/6	(50—60)/(2—6)	1	1—2	160/24	34—39
Изоляция с пропиткой в лаке КО-916к	До 180	180/6	(50—60)/(2—6)	1	1—2	180/20	30—35

Таблица 8.17

Количественные и качественные показатели, характеризующие материалы, входящие в систему изоляции тяговых электрических машин

Компонент корпусной изоляции	$E_{пр}$	Механическая прочность	λ при $t = 150 \div 200$ °C, Вт/(м·K)	ρ , Ом·м	ε	Нагревостойкость	Технологичность в переработке
Слюдяная бумага	Низкая	Низкая	80,0—90,0	—	—	Более 300 °C	Мало-технологична
Стеклоткань	Низкая	Высокая	0,06—0,08	10^{17}	6,3	Более 300 °C	Технологична
Полимерная пленка	Высокая	Высокая	0,08—0,14	Более 10^{17}	2,1—3,5	F—C	Технологична
Пропиточный состав: непотимизированный	Низкая	Низкая	—	—	—	—	Технологичный
потимизированный	Высокая	Высокая	0,24—0,35	10^{14}	6,0	F—C	Не технологичный

ским лаком КО-916к. Применение технологии «Термолит» позволяет более чем в 3 раза сократить эти процессы.

Основную электрическую нагрузку тяговых электродвигателей несут витковая и корпусная (основная) изоляция. В связи с этим необходимо изучить влияние каждого материала, входящего в корпусную изоляцию, на электрические и тепловые характеристики. Корпусная изоляция состоит из стеклоткани, слюдяной бумаги, полимерной пленки и пропитывающего состава.

В табл. 8.17 приведены данные, характеризующие свойства каждого материала, входящего в корпусную изоляцию.

Электрическая изоляция тягового электродвигателя должна обладать не только высокими электрическими характеристиками, но и длительно работать при допустимых повышенных нагрузках и температурах. Для работы тягового электродвигателя при повышенных температурах без ухудшения электрических свойств изоляции узлы тягового электродвигателя должны иметь хороший отвод тепла. В условиях эксплуатации двигателя бывает недостаточно иметь хорошую вентиляцию. Необходимо, чтобы тяговый электродвигатель имел систему электрической изоляции, рассчитанную на конкретные условия эксплуатации, и с повышенной теплопроводностью λ .

Лучшими проводниками тепла являются твердые неорганические вещества, в большинстве случаев металлы, у которых λ лежит в пределах от 3 до 418 Вт/(м · К). Теплопроводность чистых металлов, за исключением алюминия, с возрастанием температуры убывает. Тепло в металлах переносят главным образом свободные электроны. Самым теплопроводным металлом является чистое серебро [$\lambda = 418$ Вт/(м · К)].

Теплопроводность материалов, имеющих пористую структуру (теплоизоляционные), при повышении температуры возрастает по линейному закону. Значительное влияние на теплопроводность пористых материалов оказывают газы, заполняющие поры и обладающие весьма малой теплопроводностью по сравнению с теплопроводностью твердых компонентов. Именно воздух или газы, заполняющие поры и полости и имеющие весьма малые значения λ , оказывают существенное влияние на теплопроводность материала в целом. Пористые материалы передают тепло в основном через твердый компонент («скелет») и в меньшей степени через воздушные ячейки, так как теплопроводность твердого компонента в десятки раз превышает теплопроводность воздуха. Поэтому теплопроводность пористых материалов сильно зависит от соотношения масс «скелета» и воздушных включений, т.е. от объемной плотности материала. С уменьшением объемной плотности, т.е. с утонением стенок ячеек, передача тепло по «скелету» материала ухудшается, но при этом увеличиваются размеры воздушных включений, что приводит к появлению организованного движения молекул, т.е. к конвективному теплообмену. С повышением температуры ухудшаются теплоизоляционные свойства пористых материалов. Это объясняется увеличением теплопроводности воздуха и возрастанием роли теплообмена между стенками воздушных ячеек, а также возникновением свободной конвекции в порах и ячейках материала.

Данная теория описывает процессы, происходящие в теплоизоляционных материалах. В некоторой степени эти рассуждения можно применить и к электроизоляционным материалам, так как стеклоткани, слюдяные бумаги в чистом виде имеют пористую структуру. На рис. 8.23 и 8.24 представлены зависимости теплопроводности стеклоткани и слюдяной бумаги в исходном состоянии соответственно от температуры, где подтверждается наличие воздушных включений низкими значениями теплопроводности. Стеклоткань по своему строению имеет сетчатую структуру, множество воздушных включений и в чистом виде является хорошей теплоизоляцией.

В готовой системе электрической изоляции тягового электродвигателя также могут присутствовать воздушные включения, которые образуются в результате применяемой технологии. Образованные воздушные включения снижают не только теплопроводность системы, но и электрическую прочность.

Твердые неметаллические тела (большинство материалов, за исключением таких, как фарфор, стекло) характеризуются значительно меньшей теплопроводностью (полимерные пленки, полимеризованные смолы). На рис. 8.25 пред-

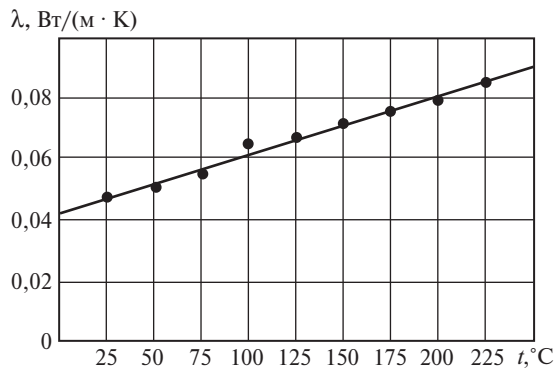


Рис. 8.23. Зависимость теплопроводности стеклоткани от температуры

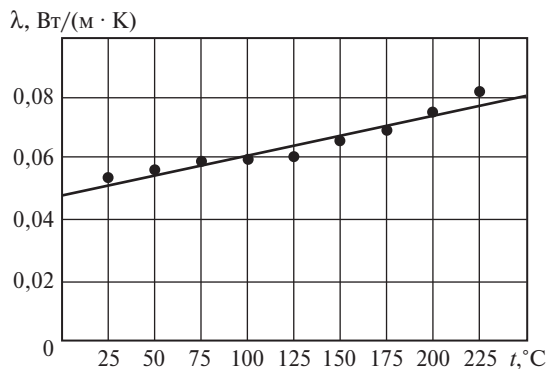


Рис. 8.24. Зависимость теплопроводности слюдяной бумаги от температуры

ставлены зависимости теплопроводности отечественной и импортной полиимидных пленок от температуры. Как видно, эти характеристики зависят от исходных компонентов и структуры пленки. Плохая проводимость тепла этих веществ объясняется их строением, так как перенос тепла осуществляется в них главным образом колебаниями молекул и атомов кристаллической решетки, а также подвижностью радикалов, сегментов длинных молекул и т.п.

Как известно, теплопроводность металлов достаточно велика. Для меди $\lambda_m = 385 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, для электротехнической стали $\lambda_{\text{эл.ст}} = 20 \div 45 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Теплопроводность традиционных электроизоляционных материалов составляет $0,10 \div 0,23 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Вследствие этого перепады температуры в изоляции обмоток электрических машин получаются значительными, что затрудняет охлаждение обмоток и ограничивает линейную нагрузку и плотность тока. На рис. 8.26 изображена схема паза якоря, где видно, какими составляющими изоляции и проводников осуществляется теплопередача.

Очевидно, что материалы, входящие в систему электрической изоляции любой электрической машины, имеют различную теплопроводность. Справочных данных для каждого материала, входящего в систему электрической изоляции, и компонента, входящего в композиционный электроизоляционный материал, применяемого в СССР и в настоящее время в РФ, как правило, немного. Значения теплопроводности стеклоткани, слюдяной бумаги и ряда компонентов, входящих в электроизоляционный материал и систему, приведенные в табл. 8.17, получены опытным путем и будут описаны ниже более подробно.

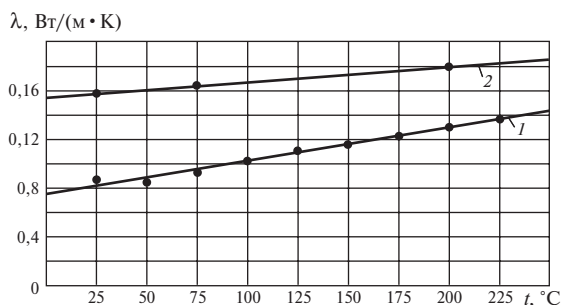


Рис. 8.25. Зависимость теплопроводности полиимидной пленки ПМ от температуры:

1 — пленка отечественная; 2 — импортная

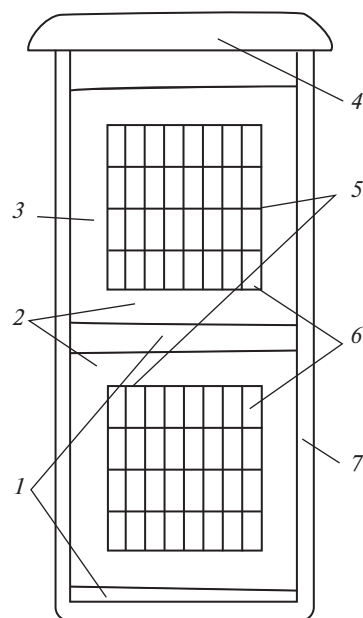


Рис. 8.26. Схема паза якорной секции:

1 — межслойная изоляция; 2 — корпусная изоляция; 3 — воздух; 4 — пазовый клин; 5 — витковая изоляция; 6 — медный проводник; 7 — выстилка паза

Для обеспечения хорошей теплопроводности от проводника к «железу» или в окружающую среду через электрическую изоляцию последняя должна обладать достаточно высокой теплопроводностью, а так как система многокомпонентная, необходимо подбирать материалы с более высокими ее значениями, что практически невозможно. Тяговые электродвигатели, эксплуатируемые в экстремальных условиях, должны иметь систему электрической изоляции класса нагревостойкости Н с теплопроводностью $0,25\text{—}0,30\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Для определения теплопроводности корпусной (основной) изоляции тягового электродвигателя разделим компоненты, входящие в нее, на органические и неорганические. Вследствие химического строения и физических характеристик более высокой теплопроводностью обладают неорганические вещества, у органических веществ теплопроводность значительно ниже.

Корпусная изоляция ТЭД в большинстве случаев состоит из слюдяной ленты. Поэтому рассмотрим четырехкомпонентный композиционный материал, в который входят стеклоткань, слюдяная бумага, полимерная пленка и пропиточный состав. К органическим компонентам относятся полимерная пленка и пропиточный состав, к неорганическим — слюдяная бумага и стеклоткань.

Для производства *стеклотканей*, применяемых в электротехнике, как правило, используют алюмоборосиликатное стекло, которое имеет хорошие электрические и тепловые характеристики, высокие теплопроводность и нагревостойкость: рабочая температура может достигать $550\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\lambda_{\text{ст}} = 10,4\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\epsilon_{\text{ст}} = 6,3$ при температуре $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $f = 1\text{ МГц}$; $\rho_{V\text{ст}} = 10^{17}\text{ Ом} \cdot \text{м}$.

В электрической изоляции применять стекло в чистом виде невозможно и нетехнологично. В связи с этим из стекла изготавливают волокна, которые переплетаются между собой. Таким образом получают стекловолокно, а уже из стекловолокна изготавливают стеклоткани. Стеклоткани в электрической изоляции используют в качестве армирующих материалов и подложек для увеличения механической прочности материалов.

В *слюдах* проявляется резкая анизотропия электрофизических и теплофизических свойств из-за особенностей кристаллической структуры. В чистом виде кристаллы (чешуйки) слюды в перпендикулярном направлении плоскостям спайности имеют высокие электрические свойства и невысокую теплопроводность (по сравнению с чистым стеклом в 20 раз ниже), высокую нагревостойкость и могут применяться при температуре $600\text{—}800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплопроводность слюды перпендикулярно плоскостям спайности $\lambda_{\text{сл}} = 0,5\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. С повышением температуры теплопроводность слюды возрастает и может достигать $0,75\text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. В то же время теплопроводность слюды параллельно слоям примерно в 10 раз превышает указанные выше значения.

Полиимидная пленка. Ниже даны значения теплопроводности, полученные в середине 60-х годов фирмой Du Pont (США) на пленке КЭПТОН Н (аналог советской или российской полиимидной пленки):

при температуре 25 °С $\lambda_{пл} = 0,1557 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

при температуре 75 °С $\lambda_{пл} = 0,1629 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

при температуре 200 °С $\lambda_{пл} = 0,1784 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

при температуре 300 °С $\lambda_{пл} = 0,1888 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Из приведенных значений видно, что происходит увеличение теплопроводности с ростом температуры. Теплопроводность отечественной полиимидной пленки несколько ниже.

Большое влияние на многие свойства электрической изоляции и на мощность электрической машины оказывает теплопроводность электроизоляционного материала и монолитность электрической изоляции.

Якорная катушка (секция) в поперечном сечении имеет прямоугольный вид. Основным источником тепла в якоре являются проводники (витки) якорной секции и диэлектрические потери в изоляции. Распространение тепла происходит по четырем направлениям (см. рис. 8.26): к стенкам паза, к дну паза и по направлению к клину. Чем монолитнее конструкция изоляции во всех направлениях, тем лучше происходит отвод тепла к железу якоря.

Рассмотрим распространение тепла в сторону пазовой стенки от одного проводника. Между проводником и стенкой паза находится три вида изоляции: витковая, корпусная и пазовая. В такой конструкции все виды изоляции имеют свою теплопроводность или свое тепловое сопротивление. Простейшая схема тепловых сопротивлений, представленная на рис. 8.27, аналогична электрической без учета имеющихся дефектов.

Каждый вид изоляции, в свою очередь, является многокомпонентной системой, состоящей минимум из двух электроизоляционных материалов.

Проводник может быть использован как с готовой изоляцией, так и без нее. В первом случае витковая изоляция состоит из эмали (эмалированный провод) и двух слоев стеклоткани, пропитанной электроизоляционным связующим (для уменьшения механических повреждений эмали). Во втором случае в качестве витковой изоляции используют пропитанную стеклослюдинитовую ленту, состоящую из стеклоткани, слюдяной бумаги и полимерной пленки. Для пропитки стеклослюдинитовых лент используют пропиточный состав: лак или компаунд.

Рассматривая распространение теплового потока через витковую изоляцию, можно представить схему тепловых сопротивлений.

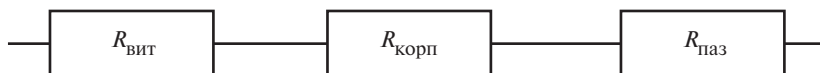


Рис. 8.27. Схема тепловых сопротивлений электрической изоляции от витка к стенке паза:

$R_{вит}$ — тепловое сопротивление витковой изоляции; $R_{корп}$ — тепловое сопротивление корпусной изоляции; $R_{паз}$ — тепловое сопротивление пазовой изоляции

Использование стеклослюдинитовой ленты в качестве витковой изоляции. На рис. 8.28 показано изолирование одного витка стеклослюдинитовой лентой.

При использовании голого медного проводника с последующим изолированием пропитанной стеклослюдинитовой лентой (один слой с перекрытием в 1/2 ширины лент) согласно рис. 8.28 тепловые сопротивления выглядят, как показано на рис. 8.29.

Расчетное тепловое сопротивление витковой изоляции аналогично электрическому может быть представлено:

$$R_{\text{вит}} = R_{\text{воз}} + \left[R_{\text{пл}} + \frac{(R_{\text{сл.б}} + R_{\text{ст}})R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{св}}} \right] + R_{\text{св}}. \quad (8.1)$$

В скобках указано тепловое сопротивление стеклослюдинитовой ленты без учета возможных воздушных включений.

При детальном рассмотрении конструкции стеклослюдинитовой ленты кроме основных компонентов, входящих в нее, между слоями находится незначительное количество воздуха. Однако даже малое количества воздуха будет влиять на многие характеристики изоляции (и витковой, и корпусной). Значи-

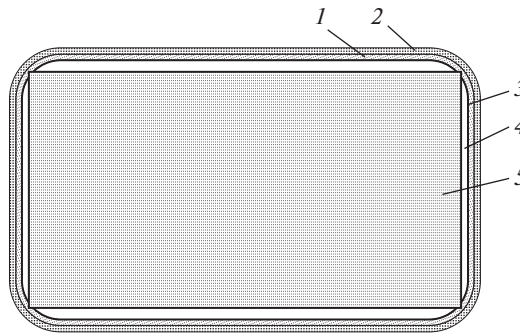


Рис. 8.28. Изолирование витка стеклослюдинитовой лентой:

1 — пропитанная слюдяная бумага; 2 — пропитанная стеклоткань; 3 — пленка; 4 — воздух; 5 — проводник

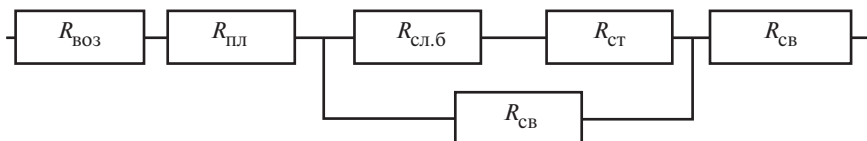


Рис. 8.29. Схема тепловых сопротивлений витковой изоляции из пропитанной стеклослюдинитовой ленты:

$R_{\text{воз}}$ — тепловое сопротивление воздуха; $R_{\text{пл}}$ — тепловое сопротивление пленки; $R_{\text{сл.б}}$ — тепловое сопротивление слюдяной бумаги; $R_{\text{ст}}$ — тепловое сопротивление стеклоткани; $R_{\text{св}}$ — тепловое сопротивление связующего состава

тельно ухудшаются теплопроводящие свойства изоляции, снижается электрическая прочность. На рис. 8.30 изображена схема стеклослюдинитовой ленты.

На рис. 8.31 представлена схема тепловых сопротивлений для стеклослюдинитовой ленты без учета воздушных включений между пленкой и проводником.

Расчетное сопротивление стеклослюдинитовой ленты с учетом воздушных включений следующее:

$$R_{\text{ленты}} = R_{\text{пл}} + \frac{\left(\frac{R_{\text{сл.б}} R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} \right) R_{\text{воз}}}{\frac{R_{\text{сл.б}} R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} + R_{\text{воз}}} + \frac{R_{\text{воз}} R_{\text{св}}}{R_{\text{воз}} + R_{\text{св}}} + \frac{R_{\text{ст}} R_{\text{св}}}{R_{\text{ст}} + R_{\text{св}}}. \quad (8.2)$$

Расчетное сопротивление витковой изоляции с учетом воздушной прослойки между проводником и стеклослюдинитовой лентой имеет вид:

$$R_{\text{вит}} = R_{\text{воз}} + R_{\text{пл}} + \frac{\left(\frac{R_{\text{сл.б}} R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} \right) R_{\text{воз}}}{\frac{R_{\text{сл.б}} R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} + R_{\text{воз}}} + \frac{R_{\text{воз}} R_{\text{св}}}{R_{\text{воз}} + R_{\text{св}}} + \frac{R_{\text{ст}} R_{\text{св}}}{R_{\text{ст}} + R_{\text{св}}}. \quad (8.3)$$

Из приведенных схем и формул видно, что наличие воздуха внутри стеклослюдинитовой ленты и витковой изоляции значительно увеличивает тепловое

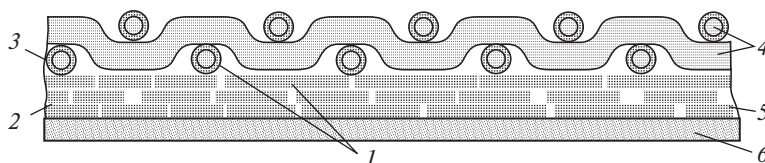


Рис. 8.30. Схематическое изображение компонентов, входящих в стеклослюдинитовую ленту:

1 — воздушные включения; 2 — чешуйки слюды слюдяной бумаги; 3 — пропиточный состав на стеклоткани; 4 — стеклоткань; 5 — пропитанная слюдяная бумага; 6 — пленка

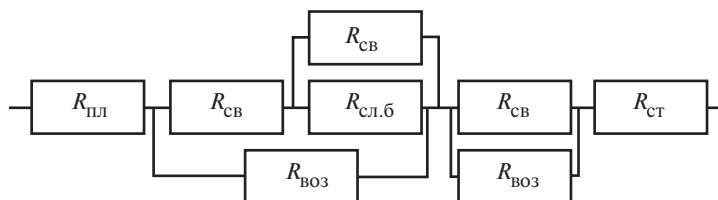


Рис. 8.31. Схема тепловых сопротивлений витковой изоляции из пропитанной стеклослюдинитовой ленты без воздушных включений между проводником и пленкой

сопротивление последней, т.е. ухудшает теплопроводность от проводника к корпусной изоляции.

Корпусная изоляция, в свою очередь, обеспечивает теплопередачу аналогично теплопередаче в витковой изоляции.

Использование изолированного обмоточного провода. Для снижения теплового сопротивления витковой изоляции, воздушных включений, отрицательно влияющих на ее характеристики, применяют изолированный обмоточный провод. Применение обмоточного провода дает ряд преимуществ перед неизолированным проводником. Во-первых, исключается ручное изолирование стеклослюдинитовой лентой каждого витка секции. Во-вторых, уменьшается количество элементов, входящих в витковую изоляцию, без ухудшения ее электрофизических свойств, т.е. возможно уменьшение толщины изоляции. В-третьих, уменьшение числа элементов, входящих в витковую изоляцию, может снижать ее тепловое сопротивление, тем самым улучшается теплопроводность.

Для наглядности на рис. 8.32 схематично показано расположение каждого материала на проводнике.

На рис. 8.33 представлена схема тепловых сопротивлений готового обмоточного провода.

Сравнивая рис. 8.28 с рис. 8.32, видим, что преимущество имеет изоляция, выполненная по схеме рис. 8.32. Количество элементов, входящих в витковую изоляцию по схеме на рис. 8.32, составляет три, тогда как по схеме рис. 8.28 это количество равно пяти.

Наличие воздушных включений у обмоточного провода также имеет место. Схема тепловых сопротивлений с учетом воздуха представлена на рис. 8.34.

Наличие воздуха внутри изоляции отрицательно сказывается на многих ее характеристиках. При идеальных условиях, без воздуха, тепловое сопротивление витковой изоляции рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{вит}} = R_{\text{эм}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{св}} \quad (8.4)$$

Рис. 8.32. Схема расположения витковой изоляции обмоточного провода:

1 — воздушные включения; 2 — лаковое покрытие стеклоткани; 3 — стеклонить; 4 — эмалевое покрытие проводника; 5 — проводник

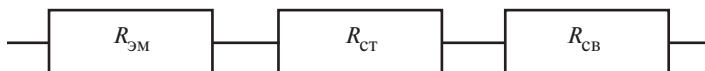
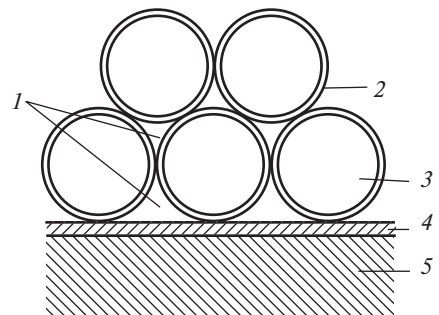


Рис. 8.33. Тепловые сопротивления изоляции готового обмоточного провода:

$R_{\text{эм}}$ — тепловое сопротивление эмали, нанесенной на проводник в процессе изготовления провода;

$R_{\text{ст}}$ — тепловое сопротивление стеклонити; $R_{\text{св}}$ — тепловое сопротивление связующего

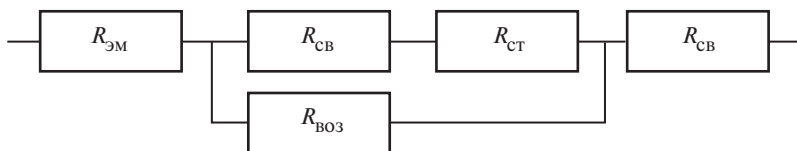


Рис. 8.34. Схема тепловых сопротивлений витковой изоляции готового обмоточного провода с учетом воздушных включений

Расчетная формула для теплового сопротивления витковой изоляции с учетом воздуха имеет вид:

$$R_{\text{вит}} = R_{\text{эм}} + \frac{R_{\text{воз}}(R_{\text{св}} + R_{\text{ст}})}{R_{\text{воз}} + R_{\text{св}} + R_{\text{ст}}} + R_{\text{св}}. \quad (8.5)$$

В действительности на тепловые и электрофизические характеристики витковой изоляции влияет не только воздух, но и множество других факторов: применяемые материалы, технология изготовления, качество готовой изоляции и многое др. Все вышеперечисленные факторы могут значительно снижать электрические и теплофизические свойства витковой изоляции.

Расчетная схема теплового сопротивления корпусной изоляции. Корпусная изоляция тягового электродвигателя состоит из нескольких слоев, нанесенных с перекрытием в 1/2 ширины пропитанной стеклослюдинитовой ленты и одного слоя покровной изоляции (стеклолента ЛЭС).

В соответствии с рис. 8.31, предполагая отсутствие воздушной прослойки между пленкой и проводником, расчетное тепловое сопротивление одного слоя стеклослюдинитовой ленты с учетом воздушных включений внутри ее будет следующее:

$$R_{\text{ленты}} = R_{\text{пл}} + \frac{\left(\frac{R_{\text{сл.б}} R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} \right) R_{\text{воз}}}{\frac{R_{\text{сл.б}} R_{\text{св}}}{R_{\text{сл.б}} + R_{\text{св}}} + R_{\text{св}} + R_{\text{воз}}} + \frac{R_{\text{воз}} R_{\text{св}}}{R_{\text{воз}} + R_{\text{св}}} + \frac{R_{\text{ст}} R_{\text{св}}}{R_{\text{ст}} + R_{\text{св}}}. \quad (8.6)$$

Расчетное сопротивление всей корпусной изоляции имеет следующий вид:

$$R_{\text{корп}} = \sum_{n=2}^i R_{i \text{ ленты}} + R_{\text{ст}}, \quad (8.7)$$

где $R_{i \text{ ленты}}$ — тепловое сопротивление i -го слоя стеклослюдинитовой ленты; $R_{\text{ст}}$ — тепловое сопротивление стеклоленты.

С учетом теплового сопротивления воздуха между слоями стеклослюдинитовой ленты формула для расчета теплового сопротивления корпусной изоляции примет следующий вид:

$$R_{\text{корп}} = \sum_{n=2}^i \frac{R_{i \text{ ленты}} R_{(i-1) \text{ воз}}}{R_{i \text{ ленты}} + R_{(i-1) \text{ воз}}} + R_{\text{ст}}, \quad (8.8)$$

где $R_{(i-1)\text{воз}}$ — тепловое сопротивление воздуха между слоями стеклослюдинитовой ленты.

Пазовая изоляция, как правило, состоит из одного слоя композиционного листового материала (прессованная композиция, состоящая из пленки и стеклоткани).

Схема тепловых сопротивлений пазовой изоляции (выстилка паза) выглядит, как показано на рис. 8.35.

Так же, как и ранее, рассматривая идеальный материал (без учета воздушных включений), тепловое сопротивление пазовой изоляции можно рассчитать по формуле:

$$R_{\text{паз}} = R_{\text{пл}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{св}}. \quad (8.9)$$

С учетом воздушных включений тепловая схема пазовой изоляции аналогична тепловой схеме витковой изоляции с заменой теплового сопротивления эмали на тепловое сопротивление пленки. В этом случае расчетное сопротивление пазовой изоляции будет иметь вид:

$$R_{\text{паз}} = R_{\text{пл}} + \frac{R_{\text{воз}}(R_{\text{св}} + R_{\text{ст}})}{R_{\text{воз}} + R_{\text{св}} + R_{\text{ст}}} + R_{\text{св}}. \quad (8.10)$$

Наличием воздуха во всех рассмотренных типах изоляции пренебрегать нельзя, так как тепловое сопротивление воздуха в несколько раз больше теплового сопротивления органического материала и на несколько порядков больше этого параметра для неорганических материалов.

Таким образом, общее тепловое сопротивление электрической изоляции от проводника к стенке паза с учетом всех воздушных включений и прослоек согласно рис. 8.27 может достигать достаточно больших значений. Для снижения этой величины в электрической изоляции необходимо исключить все воздушные включения, входящие в нее, т.е. сделать изоляцию монолитной.

Для оценки теплопроводности системы электрической изоляции необходимо владеть знаниями о значениях λ всех ее компонентов. С этой целью проведены измерения компонентов пропитанной стеклослюдинитовой ленты, входящей в корпусную изоляцию.

Исследования проводились на измерителе теплопроводности «ИТ- λ -400» в диапазоне температур 0—225 °С. Образцы для определения теплопроводности подготавливались согласно методике, представленной в описании измерителя, и имели диаметр 15 мм. Толщина образцов при определении теплопроводности одного компонента изменялась в зависимости от толщины исследуемого мате-

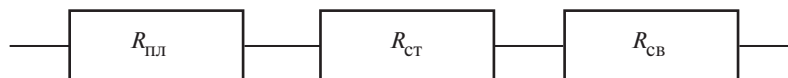


Рис. 8.35. Схема тепловых сопротивлений пазовой изоляции:

$R_{\text{пл}}$ — тепловое сопротивление полимерной пленки; $R_{\text{ст}}$ — тепловое сопротивление стеклоткани; $R_{\text{св}}$ — тепловое сопротивление связующего

риала — от 20 до 100 мкм. Образец из компаунда отливался в специальную круглую форму, обработанную антиадгезионным составом. После термообработки образец компаунда подвергался шлифованию с обеих сторон с сохранением параллельности рабочих поверхностей, обеспечивающих максимальный контакт (без воздушного зазора) с нагревателем и тепломером. Образцы, состоящие из двух и более компонентов, имели толщину 0,5 мм и набирались таким образом, чтобы их толщина приближалась к толщине на сторону корпусной изоляции узла тягового электродвигателя (якорной катушки, катушки магнитной системы). Чередование слоев компонентов изоляции также соответствовало конструкции изоляции узлов тягового электродвигателя, например (полимерная пленка плюс слюдинитовая бумага плюс стеклоткань) умноженные на $n_{\text{слоев}}$ с последующей пропиткой в компаунде.

На рис. 8.36 представлены зависимости теплопроводности от температуры для каждого компонента, входящего в пропитанную стеклослюдинитовую ленту.

Самой большой теплопроводностью из компонентов, входящих в пропитанную стеклослюдинитовую ленту, обладает компаунд «Элпласт-180ИД». Низкая теплопроводность стеклоткани и слюдяной бумаги в чистом виде была рассмотрена выше и объяснялась наличием большого количества воздуха.

Для снижения количества воздуха в пористом компоненте изоляции, а следовательно, для увеличения его теплопроводности необходимо этот компонент сделать более монолитным. На машиностроительных и ремонтных предприятиях для заполнения пустот применяют пропиточные составы. На рис. 8.37 представлены зависимости теплопроводности от температуры слюдяной бумаги, пропитанной компаундом «Элпласт-180ИД», с последующей подпрессовкой (при условном давлении) и в свободном состоянии по сравнению с непропитанной слюдяной бумагой.

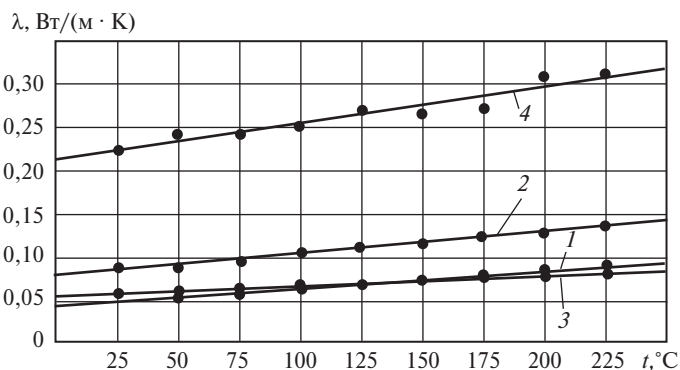


Рис. 8.36. Зависимость теплопроводности от температуры компонентов, входящих в пропитанную в стеклослюдинитовую ленту:

1 — стеклоткань непропитанная; 2 — полиимидная пленка; 3 — слюдяная бумага непропитанная; 4 — полимеризованный компаунд «Элпласт-180ИД»

Из полученных данных видно, что теплопроводность слюдяной бумаги, пропитанной компаундом «Элпласт-180ИД», несколько увеличивается, но наличие воздуха между слоями бумаги отрицательно сказывается на значении теплопроводности композиции.

Большой эффект по увеличению теплопроводности получается у композиции, подпрессованной с некоторым усилием.

Аналогичные исследования были проведены на стеклоткани, применяемой в стеклослюдинитовой ленте. Полученные зависимости представлены на рис. 8.38. Из представленных данных видно имеется значительное увеличение теплопроводности пропитанной и спрессованной стеклоткани. Увеличение теплопроводности происходит из-за заполнения пористой структуры стеклоткани пропиточным составом.

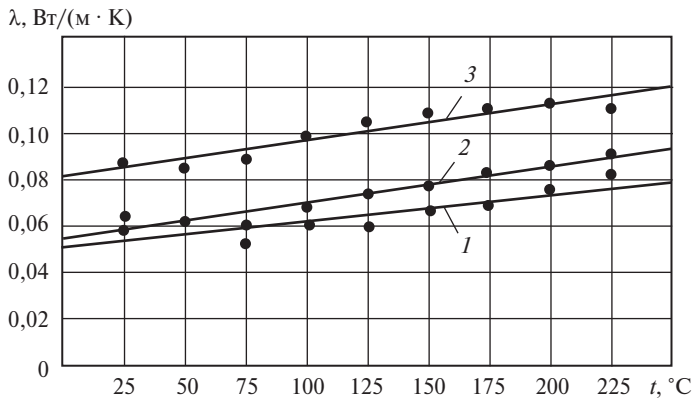


Рис. 8.37. Зависимость теплопроводности от температуры слюдяной бумаги:

1 — бумага непропитанная; 2 — пропитанная компаундом «Элпласт-180ИД» неопрессованная; 3 — пропитанная компаундом «Элпласт-180ИД» и подпрессованная при условном давлении

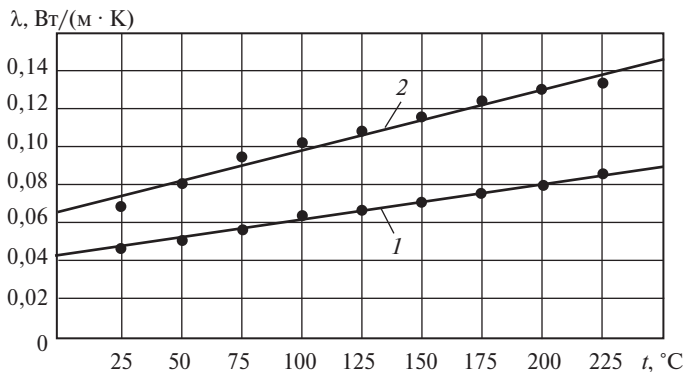


Рис. 8.38. Зависимость теплопроводности от температуры стеклоткани:

1 — стеклоткань непропитанная; 2 — пропитанная компаундом «Элпласт-180ИД» и подпрессованная при условном давлении

Сравнивая зависимости, приведенные на рис. 8.37 и 8.38, можно отметить, что при более высоких температурах (100—250 °С) теплопроводность пропитанной стеклоткани выше теплопроводности пропитанной слюдяной бумаги из-за более высокой теплопроводности чистого стекла, применяемого для изготовления стекловолокон.

При температурах до 100 °С теплопроводность композиции, состоящей из слюдяной бумаги, имеет более высокие значения по сравнению с композицией на основе стеклоткани.

Более наглядно для сравнения изменения теплопроводности пропитанных и непропитанных материалов от температуры представлены на рис. 8.39.

Полученные зависимости теплопроводности пропитанных материалов проходят несколько выше зависимостей непропитанных материалов и повторяют характер изменения теплопроводности этих материалов в «сухом» (непропитанном) виде. Это может свидетельствовать о том, что после пропитки компаундом «Элпласт-180ИД» были заполнены воздушные включения.

В структуре электрической изоляции слюдяная бумага является одним из основных диэлектрических барьеров. Слюдяная бумага имеет низкую механическую прочность и в чистом виде применяться не может. Для увеличения ее механической прочности в стеклослюдинитовых лентах используют стеклоткань в качестве подложки, которая и обеспечивает механическую прочность всей стеклослюдинитовой ленты, необходимую во время проведения изоляционных работ.

На рис. 8.40 представлена зависимость теплопроводности композиции, состоящей из слюдяной бумаги и стеклоткани, пропитанной компаундом «Элпласт-180ИД».

Сравнивая полученную зависимость с предыдущими, полученными при таких же условиях термообработки и прессования, видим, что в зоне температур до 30 °С теплопроводность близка к значениям для композиции из пропитанной

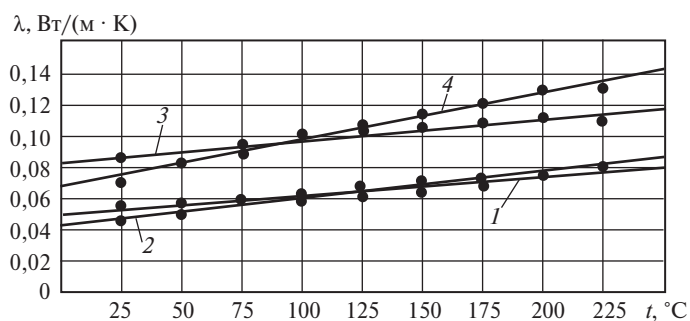


Рис. 8.39. Зависимость теплопроводности непропитанных и пропитанных в компаунде «Элпласт-180ИД» с последующей опрессовкой композиций от температуры:

1 — непропитанная слюдяная бумага; 2 — непропитанная стеклоткань; 3 — пропитанная компаундом «Элпласт-180ИД» и подпрессованная при условном давлении слюдяная бумага; 4 — пропитанная компаундом «Элпласт-180ИД» и подпрессованная при условном давлении стеклоткань

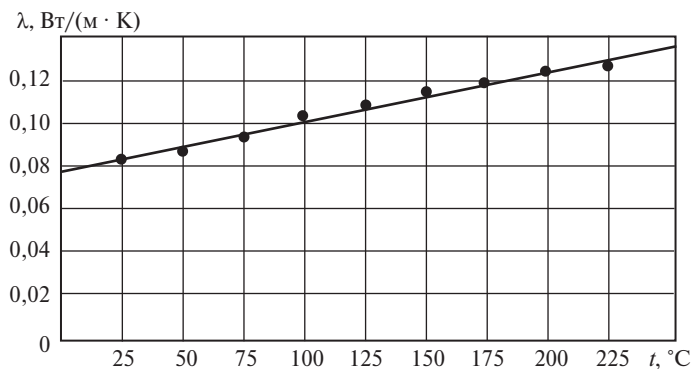


Рис. 8.40. Зависимость теплопроводности слюдяной композиции (стеклоткань плюс слюдяная бумага), пропитанной компаундом «Элпласт-180ИД» и подпрессованной при условном давлении от температуры

и подпрессованной слюдяной бумаги, но несколько меньше. В этом диапазоне температур доминируют тепловые свойства слюды. При температурах более 130 °C теплопроводность композиции из слюдяной бумаги и стеклоткани имеет значения немного ниже, чем полученные для композиции стеклоткани. В диапазоне температур от 30 до 130 °C зависимость трехкомпонентной системы проходит несколько выше зависимостей, характерных для двухкомпонентных систем.

Таким образом, опытным путем было показано, что более монолитная система изоляции имеет большую теплопроводность, более стабильные теплофизические характеристики.

В большинстве случаев для увеличения уровня пробивного напряжения корпусной изоляции используют стеклослюдинитовые ленты, в структуру которых входит полимерная пленка. Для систем электрической изоляции с классом нагревостойкости Н и выше в качестве полимерной пленки используют полиимид или производные на его основе. Зависимость теплопроводности композиции полиимидная пленка плюс слюдинитовая бумага плюс стеклоткань с последующей пропиткой [окунанием и по технологии вакуум-нагнетательной пропитки (VPI)] в компаунде «Элпласт-180ИД» по сравнению с композицией слюдяная бумага плюс стеклоткань представлены на рис. 8.41.

Из представленных данных видно, что композиция с полиимидной пленкой обладает более высокой теплопроводностью по сравнению с композицией без пленки. При изготовлении системы электрической изоляции методом окунания с незначительной подпрессовкой значения теплопроводности соответствуют прямым 1 и 2. Низкие значения теплопроводности показывают, что проникновение пропиточного состава в микропоры композиции является более затруднительным, а при условии использования пленки возможно наличие воздушных прослоек.

При изготовлении системы электрической изоляции по технологии VPI происходит более глубокое проникновение пропиточного состава во внутренние

слои изоляции и заполнение микропор. Теплопроводность значительно увеличивается (прямые 3 и 4 на рис. 8.41).

Лучшей теплопроводностью обладает система с более монолитной структурой. На монолитность системы изоляции влияет технология изготовления. На рис. 8.42 представлен характер изменения теплопроводности стеклоткани (от температуры) в зависимости от технологического воздействия на ее структуру после пропитки.

Материал, полученный прессованием при большом удельном давлении, обладает самой высокой теплопроводностью. Такие значения получаются из-за воздействия высокого давления на материал. В таких случаях происходит

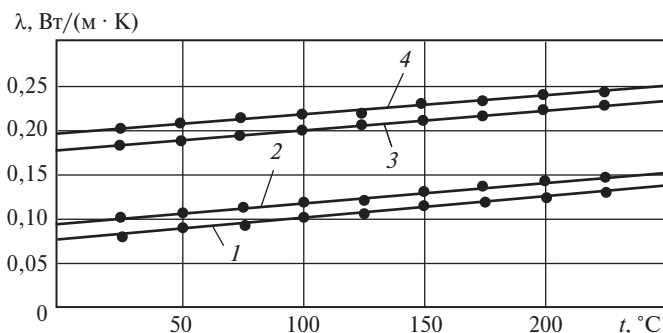


Рис. 8.41. Зависимость теплопроводности композиций, пропитанных разными способами компаундом «Элпласт-180ИД» от температуры:

1 — стеклоткань плюс слюдяная бумага, пропитанные методом окунания с подпрессовкой при условном давлении; 2 — стеклоткань плюс слюдяная бумага плюс полиимидная пленка, пропитанные методом окунания с подпрессовкой при условном давлении; 3 — стеклоткань плюс слюдяная бумага, пропитанные по технологии VPI; 4 — стеклоткань плюс слюдяная бумага плюс полиимидная пленка, пропитанные по технологии VPI

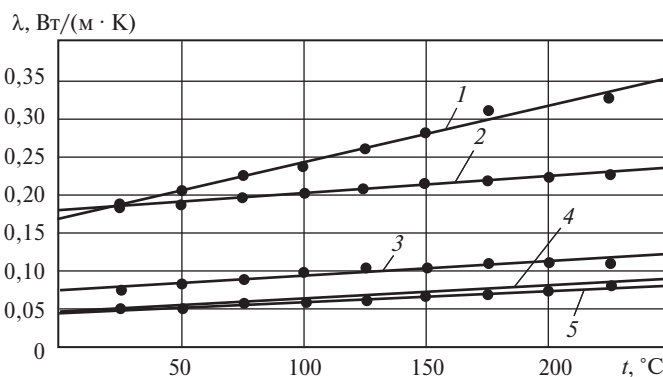


Рис. 8.42. Зависимость теплопроводности стеклоткани, пропитанной и прессованной различными способами от температуры:

1 — стеклоткань, прессованная при условном давлении 10 ед.; 2 — стеклоткань, пропитанная по технологии VPI; 3 — стеклоткань, прессованная при условном давлении 1 ед.; 4 — пропитанная и непрессованная стеклоткань; 5 — непропитанная стеклоткань

уменьшение расстояния между волокнами стеклоткани, а следовательно, улучшается теплопередача между ними.

Для получения более монолитной системы электрической изоляции и увеличения ее теплопроводности до $0,35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ и выше необходимо совместить две технологии в одну — технологию вакуум-нагнетательной пропитки системы (или материала) с последующим прессованием при высоком давлении. В настоящее время для изготовления системы электрической изоляции тягового электродвигателя возможно применение только технологии VPI из-за сложности конструкции узлов.

На рис. 8.43 представлены зависимости теплопроводности стекломиколенты ЛМК-ТТ с пропиткой окунанием в кремнийорганический лак КО-916 и стеклослюдинитовой ленты «Элизтерм-180ТТ» с последующей пропиткой в компаунде «Элпласт-180ИД» (окунанием и методом вакуум-нагнетательной пропитки).

Пропитки окунанием в компаунд или лак недостаточно для обеспечения более эффективной теплопередачи через изоляцию из-за невозможности проникновения пропиточного состава в ее внутренние слои. При пропитке по технологии VPI после вакуумирования и в момент подачи компаунда последний проникает во внутренние слои изоляции, делая ее более монолитной.

В ВЭЛНИИ были проведены ресурсные испытания на моделях изоляции, выполненных по технологии «Термолит» по классу нагревостойкости Н. Испытания состояли из 10 циклов, каждый цикл включал в себя:

- тепловое старение изоляции в течение 144 ч при температуре 210°C ;
- увлажнение изоляции в течение 8 ч при относительной влажности 95—98 % и температуре $15\text{—}35^\circ\text{C}$;
- электрическое старение изоляции при напряжении 1,5 кВ в течение 8 ч;

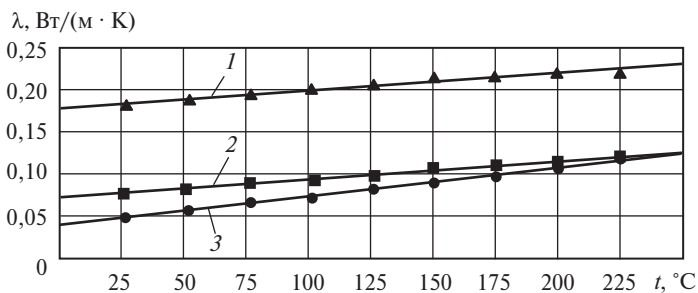


Рис. 8.43. Зависимость теплопроводности композиций, полученных окунанием и по технологии VPI от температуры:

1 — композиция, полученная с использованием ленты «Элизтерм-180ТТ», пропитанной компаундом «Элпласт-180ИД» по технологии VPI; 2 — с использованием ленты «Элизтерм-180ТТ», пропитанной компаундом «Элпласт-180ИД» методом окунания; 3 — с использованием стекломикаленты ЛМК-ТТ, пропитанной лаком КО-916 методом окунания

- воздействие смены температур (термоудары). Выдержка при минимальной температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч и при максимальной температуре $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч.

За основной критерий принималось снижение пробивного напряжения после 4, 8 и 10 циклов по сравнению с исходными данными.

В качестве корпусной изоляции использовалась лента «Элизтерм-180ТПМ» и «Элизтерм-180ТТ», чистая полиимидная пленка ПМ с пропиткой в компаунде «Элпласт-180ИД» и чистая полиимидная пленка ПМ с пропиткой в лаке КО-916.

На рис. 8.44 представлены пробивные напряжения изоляции макетов в процессе циклических испытаний. Пробивное напряжение изоляции «Термолит» в процессе этих испытаний снизилось всего на 10—15 %.

Для изучения свойств изоляции были проведены испытания на моторетах систем изоляции класса нагревостойкости С ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$) асинхронных тяговых электродвигателей. Конструкции моторет и систем изоляции (расчетные рабочее напряжение 3 кВ и класс нагревостойкости и $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно) представлены в табл. 8.18.

Для исследования срока жизни изоляции В ЭЛНИИ были проведены циклические испытания на моторетах. При этом цикл эквивалентен 6000 ч воздействия на систему изоляции температуры, равной температуре класса нагревостойкости Н ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$) и расчетного напряжения 3 кВ.

Цикл включает в себя следующие операции:

- тепловое старение в течение 144 ч при температуре $240 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- электрическое старение в течение 9 ч при напряжении 6,6 кВ (50 Гц).

После четырех циклов проводились 15 циклов испытаний изоляции на моторетах при воздействии смены температур (термоудар) методом двух камер

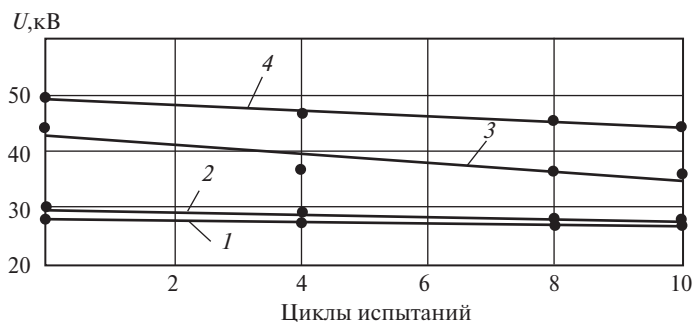


Рис. 8.44. Значение пробивного напряжения системы изоляции образцов в процессе ресурсных испытаний:

1 — система, изготовленная на основе полиимидной пленки с пропиткой в лаке КО-916к; 2 — система, изготовленная на основе полиимидной пленки с пропиткой в компаунде «Элпласт-180ИД»; 3 — система, изготовленная на основе стеклослюдинитовой ленты «Элизтерм-180ТТ» с пропиткой в компаунде «Элпласт-180ИД» (ТТ: стеклоткань плюс слюдяная бумага плюс стеклоткань); 4 — система, изготовленная на основе стеклослюдинитовой ленты «Элизтерм-180ТПМ» с пропиткой в компаунде «Элпласт-180ИД» (ТПМ: стеклоткань плюс слюдяная бумага плюс полиимидная пленка)

Таблица 8.18

Конструкции моторет и технологические операции

Конструкция и технологическая операция	Варианты систем изоляции	
	1	2
Макет сердечника статора	Стальная Ш-образная конструкция, имитирующая форму пазов статора с прилегающими элементами зубцов и спинки, длина (150 ± 1) мм	
Проводник	Отрезок провода ППИПК-2 FCR, 4×6 мм, длина (700 ± 1) мм, согнутый в средней части на ребро вокруг стержня диаметром $(10 \pm 0,5)$ мм, с углом обхвата 180°	
Количество проводников в моторете	Девять проводников, разделенных на три пакета по три проводника в каждом	
Корпусная изоляция пакета	Лента «Элмикатерм 525029», 0,1×20, четыре слоя, 1/2 ширины	Лента «Элизтерм 220ТПМ», 0,1×20, четыре слоя, 1/2 ширины
Разделительная изоляция	Пленка фторопластовая Ф-4ЭО 0,023×20, один слой, 1/2 ширины	
Покровная изоляция	Стеклолента ЛЭСБ-П(80), ТУ У17.2-34445771-003:2008, 0,1×20, один слой, 1/2 ширины	
Пазовая изоляция	«Синтофлекс 828», 0,15 мм	
Изоляция между пакетами	«Синтофлекс 828», 0,15 мм	
Клин пазовый	СПИ-У	
Прокладки под клин пазовый	«Синтофлекс 828», 0,15 мм	
Способ пропитки	Вакуум-нагнетательный	
Пропиточный состав	Компаунд «Элком 220»	Компаунд «Элпласт-220ИД»
Режим термообработки	200 °C — 12 ч	130 °C — 2 ч
		160 °C — 4 ч
		180 °C — 4 ч
Количество моторетов	18	18

(ГОСТ 16962.1). Время выдержки при каждой из указанных температур составляло 1 ч, продолжительность переноса из камеры в камеру — 5 мин, минимальная температура примерно $-(50 \pm 3)$ °C, максимальная — (130 ± 3) °C. После восьмого цикла проводили 30 циклов термоударов. После 10-го цикла проводили 45 циклов термоударов. Затем макеты вторично пропитывались соответствующим компаундом с последующей термообработкой и проводились еще четыре цикла воздействия.

Изоляция на моторетах обоих вариантов выдержала испытания контрольным напряжением в течение 1 мин.

В табл. 8.19—8.21 и на рис. 8.45—8.48 представлены:

- данные по контролю состояния изоляции неразрушающими методами;

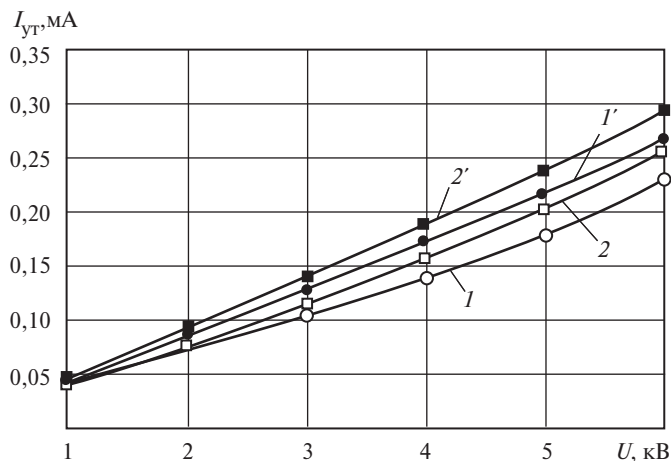


Рис. 8.45. Вольт-амперные характеристики систем изоляции в исходном состоянии:
1, 2 — варианты конструкций (1', 2' — после увлажнения)

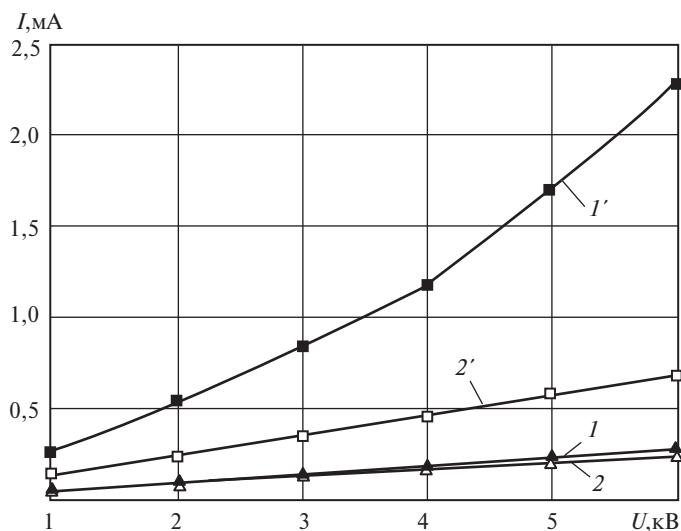


Рис. 8.46. Вольт-амперные характеристики систем изоляции после 10 циклов старения и термоударов:
1, 2 — сухое состояние; 1', 2' — после увлажнения

- расчетные показатели, отражающие степень нарушения структур систем изоляции;
- статистические оценки распределения пробивных напряжений изоляции.

При графическом изображении результатов испытаний изменения показателей между контрольными циклами представлены отрезками линейных функций.

Перед статистической обработкой массивов экспериментальных данных проводилась их проверка на присутствие грубых ошибок.

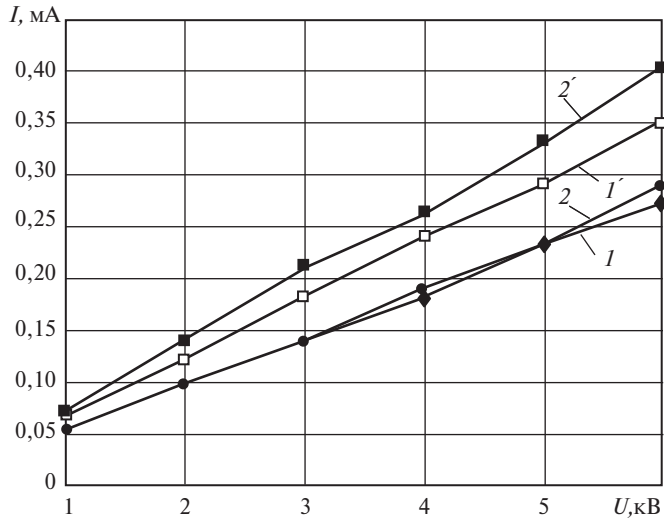


Рис. 8.47. Вольт-амперные характеристики систем изоляции после повторной пропитки:
 1, 2 — сухое состояние; 1', 2' — после увлажнения

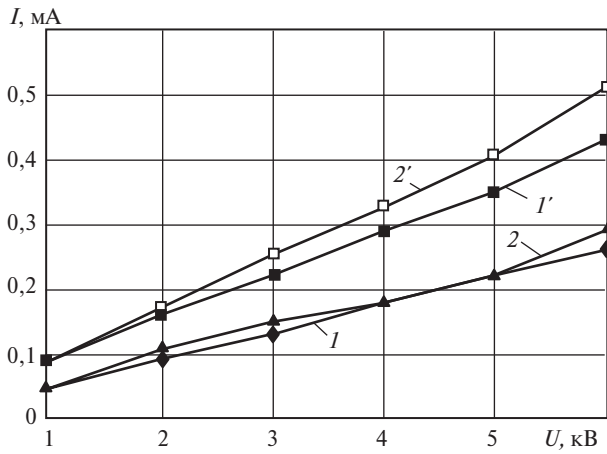


Рис. 8.48. Вольт-амперные характеристики систем изоляции после повторной пропитки, четырех циклов старения и термоударов:
 1, 2 — сухое состояние; 1', 2' — после увлажнения

Таблица 8.19

**Характеристики изоляции пакетов проводников моторет,
полученные неразрушающими методами**

Параметр	Номер варианта	
	1	2
<i>Исходное состояние</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	1,23	1,21
$\bar{\mu}$, отн. ед.	1,25	1,23
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_b , МОм	> 50 000	> 50 000
<i>После четырех циклов старения</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	2,33	2,33
$\bar{\mu}$, отн. ед.	2,01	2,33
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_b , МОм	> 50 000	> 50 000
<i>После четырех циклов старения и термоударов</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	2,72	2,42
$\bar{\mu}$, отн. ед.	2,51	2,36
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_b , МОм	3750	> 50 000
<i>После восьми циклов старения</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	2,58	2,78
$\bar{\mu}$, отн. ед.	2,46	2,32
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_b , МОм	> 50 000	> 50 000
<i>После восьми циклов старения и термоударов</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	2,90	2,79
$\bar{\mu}$, отн. ед.	2,83	2,47
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_b , МОм	> 50 000	> 50 000

8.4. Изоляция типа «Термолит»

Окончание табл. 8.19

Параметр	Номер варианта	
	1	2
<i>После 10 циклов старения</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	5,55	2,84
$\bar{\mu}$, отн. ед.	5,59	2,55
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_v , МОм	> 50 000	> 50 000
<i>После 10 циклов старения и термоударов</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	5,71	3,20
$\bar{\mu}$, отн. ед.	6,80	2,58
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_v , МОм	0,25	> 50 000
<i>После вторичной пропитки</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	1,32	1,45
$\bar{\mu}$, отн. ед.	1,30	1,40
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_v , МОм	3000	> 50 000
<i>После вторичной пропитки и четырех циклов старения</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	1,67	1,91
$\bar{\mu}$, отн. ед.	1,72	1,71
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_v , МОм	> 50 000	> 50 000
<i>После вторичной пропитки, четырех циклов старения и термоударов</i>		
$\bar{p}$, отн. ед.	1,82	1,98
$\bar{\mu}$, отн. ед.	1,72	1,92
R_c , МОм	> 50 000	> 50 000
R_v , МОм	> 50 000	> 50 000

Примечание. R_c , R_v — минимальные значения электрического сопротивления изоляции партии из n пакетов проводников в сухом и увлажненном состоянии соответственно.

Таблица 8.20

Статистические оценки пробивных напряжений изоляции пакетов проводников моторет

Параметр	Номер варианта	
	1	2
<i>Исходное состояние</i>		
n	9	9
$\bar{U}$, кВ	34,22	42,34
r , кВ	3,52	8,74
S_U , кВ	1,16	2,90
K_U , %	3,39	6,83
ΔU , кВ	$\pm 0,89$	$\pm 2,23$
$U_{\min}$, кВ	32,56	38,76
<i>После четырех циклов старения и термоударов</i>		
n	9	9
$\bar{U}$, кВ	31,97	34,61
r , кВ	4,84	5,72
S_U , кВ	1,43	1,99
K_U , %	4,44	5,75
ΔU , кВ	$\pm 1,10$	$\pm 1,53$
$U_{\min}$, кВ	29,48	31,68
<i>После восьми циклов старения и термоударов</i>		
n	9	9
$\bar{U}$, кВ	33,39	35,09
r , кВ	5,30	6,20
S_U , кВ	1,74	1,96
K_U , %	5,21	5,59
ΔU , кВ	$\pm 1,34$	$\pm 1,51$
$U_{\min}$, кВ	31,2	32,1
<i>После 10 циклов старения и термоударов</i>		
n	9	9
$\bar{U}$, кВ	31,29	35,74
r , кВ	21,56	6,16
S_U , кВ	6,84	2,07

8.4. Изоляция типа «Термолит»

Окончание табл. 8.20

Параметр	Номер варианта	
	1	2
K_U , %	21,86	5,79
ΔU , кВ	$\pm 5,27$	$\pm 1,59$
$U_{\min}$, кВ	13,2	33,44
<i>После повторной пропитки</i>		
n	6	6
$\bar{U}$, кВ	37,99	40,63
r , кВ	19,8	3,96
S_U , кВ	7,63	1,68
K_U , %	12,08	4,13
ΔU , кВ	$\pm 8,66$	$\pm 1,91$
$U_{\min}$, кВ	33,0	38,28
<i>После повторной пропитки, четырех циклов старения и термоударов</i>		
n	6	6
$\bar{U}$, кВ	28,97	36,19
r , кВ	17,36	5,72
S_U , кВ	6,26	2,35
K_U , %	21,61	6,49
ΔU , кВ	$\pm 6,57$	$\pm 2,47$
$U_{\min}$, кВ	20,24	33,44

Примечание. $\bar{U}$ — среднее значение; r — размах значений параметра; S_U — оценка среднеквадратичного отклонения; K_U — коэффициент вариации; ΔU — доверительный интервал; $U_{\min}$ — минимальное пробивное напряжение.

Расчеты проводились по формуле

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{\hat{a}}^i}{C_c^i}, \quad (8.11)$$

где n — количество пакетов проводников моторетов, подвергающихся измерениям на данном этапе испытаний; $C_{\hat{a}}^i$, C_c^i — электрическая емкость изоляции i -го пакета проводников в сухом и увлажненном состоянии, соответственно;

и по формуле

$$\bar{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_{\hat{a}}^i}{I_{\hat{n}}^i}, \quad (8.12)$$

где $I_{\hat{a}}^i, I_{\hat{n}}^i$ — токи утечки изоляции i -го пакета проводников в сухом и увлажненном состоянии, соответственно.

После испытаний рассчитывались статистические оценки результатов — коэффициенты вариации, среднеквадратичное отклонение, среднеарифметическое и доверительные интервалы.

Анализ результатов показал, что в исходном состоянии монолитность испытываемых систем изоляции находится на одном, достаточно высоком уровне, о чем свидетельствуют низкие и мало различающиеся по абсолютным значениям коэффициенты $\bar{p}$ и $\bar{\mu}$, а также электрическое сопротивление (в сухом и увлажненном состояниях) и совпадающие вольт-амперные характеристики (см. табл. 8.19 и рис. 8.45).

Электрическая прочность (пробивное напряжение) второго варианта систем изоляции в 1,25 раза выше по сравнению с первым (см. табл. 8.20).

В процессе испытаний вплоть до восьмого цикла увеличение показателей $\bar{p}$ и $\bar{\mu}$, отражающих ухудшение монолитности систем изоляции вследствие совокупности деструктивных процессов, носит практически одинаковый, монотонно возрастающий характер. Дальнейшие нагрузки вызывают скачкообразное увеличение $\bar{p}$ и $\bar{\mu}$ системы изоляции первого варианта, которые после 10 циклов превышают аналогичные показатели второго варианта практически в 2 раза (см. табл. 8.19). Изменения $\bar{p}$ и $\bar{\mu}$ коррелируют с результатами определения:

- электрического сопротивления, минимальное значение которого для увлажненной системы изоляции первого варианта после 10 циклов снизилось до 0,25 МОм;
- вольт-амперных характеристик, имеющих у системы изоляции первого варианта значительное отклонение от линейности после 10 циклов старения.

По электрической прочности системы изоляции однородны на всех этапах испытаний (коэффициент вариации K_U ниже порогового значения, равного 15 %). Исключение составляют результаты, полученные для системы изоляции первого варианта после 10 циклов старения (см. табл. 8.20). Коэффициенты вариации K_p, K_{μ} показателей $\bar{p}$ и $\bar{\mu}$ у первого варианта превышают пороговое значение уже в исходном состоянии. Более однородны свойства системы изоляции второго варианта (K_p, K_{μ} остаются ниже порогового значения до 10-го цикла испытаний, см. табл. 8.21).

Таблица 8.21

Коэффициенты вариации отношений электрических емкостей и токов утечки			
Вариант 1		Вариант 2	
$K_p, \%$	$K_\mu, \%$	$K_p, \%$	$K_\mu, \%$
<i>Исходное состояние</i>			
16,1	15,2	7,1	8,8
<i>После четырех циклов старения</i>			
23,8	31,34	7,7	11,0
<i>После четырех циклов старения и термоударов</i>			
32,0	37,0	9,9	22,0
<i>После восьми циклов старения</i>			
37,6	43,8	10,8	11,0
<i>После восьми циклов старения и термоударов</i>			
19,0	26,0	9,0	15,0
<i>После 10 циклов старения</i>			
52,4	55,8	15,8	17,8
<i>После 10 циклов старения и термоударов</i>			
77,9	95,61	55,3	21,6
<i>После вторичной пропитки</i>			
13,6	6,92	11,0	9,3
<i>После вторичной пропитки и четырех циклов старения</i>			
6,59	8,14	12,57	14,58
<i>После вторичной пропитки, четырех циклов старения и термоударов</i>			
7,69	12,79	13,64	14,13

Динамика снижения электрических характеристик испытываемых систем изоляции отличается незначительно, и преимущество второго варианта сохраняется на протяжении 10 циклов воздействия нагрузок (см. табл. 8.20).

Устойчивость системы изоляции второго варианта к воздействию смены температур (термоудары) до 10-го цикла испытаний выше, чем у системы первого варианта, увеличение $\bar{p}$ и $\bar{\mu}$ в результате термоударов у нее происходит в меньшей степени (табл. 8.22). В 10-м цикле соотношение между показателями устойчивости систем изоляции к указанным нагрузкам несколько изменилось, хотя прирост токов утечки у второго варианта остался существенно ниже.

Повторная пропитка систем изоляции приводит к восстановлению их показателей ($\bar{p}$, $\bar{\mu}$, $\bar{U}$; вольт-амперные характеристики, электрическое сопротивление) до уровня исходного состояния (см. табл. 8.19, 8.20). Свойства систем обоих вариантов после пропитки становятся однородными (K_p , K_μ , K_U меньше 15).

Таблица 8.22

Увеличение коэффициентов $\bar{p}$ и $\bar{\mu}$ систем изоляции в результате термоударов

Вариант 1		Вариант 2	
$\Delta \bar{p}$, %	$\Delta \bar{\mu}$, %	$\Delta \bar{p}$, %	$\Delta \bar{\mu}$, %
После четырех циклов старения			
16,7	4,9	3,9	3,4
После восьми циклов старения			
12,4	15,04	0,4	6,5
После 10 циклов старения			
2,9	21,7	12,7	1,2
После повторной пропитки и четырех циклов старения			
9,0	0,0	3,7	12,3

Таблица 8.23

Пробивные напряжения систем изоляции в увлажненном состоянии

Параметр	Вариант 1	Вариант 2
Пробивное напряжение, кВ	42,2; 38,8; 37,8	44,0; 39,2; 38,3

Ухудшение состояния систем изоляции в результате четырех циклов старения, оцениваемое по коэффициентам $\bar{p}$, $\bar{\mu}$, вольт-амперным характеристикам и электрическому сопротивлению, незначительно и практически одинаково для обоих вариантов. Снижение электрических характеристик в большей степени наблюдается у системы изоляции первого варианта (примерно 25 %), в то время как у второго варианта оно составило примерно 10 %. После повторной пропитки и четырех циклов старения испытания на воздействие смены температур в меньшей степени сказываются на системе изоляции первого варианта.

На небольшой выборке моторетов, прошедших повторную пропитку, дополнительно к программе определялись значения пробивных напряжений в увлажненном состоянии (1 ч выдержки в воде при температуре 25 °С). Результаты представлены в табл. 8.23.

Рассматриваемая характеристика системы изоляции второго варианта не ниже минимального значения, полученного при испытаниях на моторетах в сухом состоянии. Увлажнение выявило дефект системы изоляции первого варианта, вероятнее всего, находящийся в объеме корпусной изоляции пакета проводников и частично восстановленный повторной пропиткой.

На рис. 8.49 представлены значения пробивного напряжения изоляции макетов в процессе циклических испытаний.

Система изоляции на основе полиимидно-слюдинитовой ленты «Элиз-терм-220ТПМ» и компаунда «Элпласт-220ИД» обладает высокими и устойчивыми к воздействию циклических нагрузок свойствами, более стабильными и

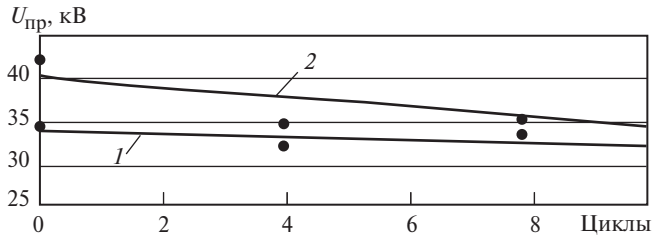


Рис. 8.49. Снижение пробивного напряжения системы изоляции образцов в процессе циклических испытаний:

1 — система на основе ленты «Элмикатерм 525029» с последующей пропиткой в компаунде «Элком 220»; 2 — система на основе ленты «Элизтерм-220ТПМ» с последующей вакуум-нагнетательной пропиткой в компаунде «Элпласт-220ИД»

однородными, чем у системы, содержащей полиимидно-слюдинитовую ленту «Элмикатерм 525029» и компаунд «Элком 220».

На предприятии ЗАО «Кросна-мотор» были проведены испытания якорей высокоскоростных электродвигателей КР-251 с наибольшей испытательной частотой вращения 5400 об/мин, пропитанных компаундом «Элпласт-180ИД». По окончании контрольного режима нагревания перегревы отдельных частей двигателя составили:

- коллектора — 110 °С;
- последовательной обмотки возбуждения — 120,3 °С;
- параллельной обмотки возбуждения — 139,8 °С;
- обмотки дополнительных полюсов — 140,8 °С;
- обмотки якоря — 141,4 °С.

Учитывая, что класс нагревостойкости изоляции электродвигателя Н, имеется большой резерв по перегревам.

Сопротивление изоляции после контрольного режима составило:

- якоря и катушек дополнительных полюсов — более 100 МОм;
- последовательной обмотки возбуждения — более 1000 МОм;
- параллельной обмотки возбуждения — более 1000 МОм.

Приведенные данные говорят о хороших электрофизических свойствах изоляции.

Также были проведены испытания полюсных моноблоков электродвигателей городского транспорта ДК-410Р, КР-251 и двигателей буровых установок Д808Б. Испытания проводились на длительную вибропрочность моноблоков двигателя ДК-410Р, пропитанных в компаунде «Элпласт-180ИД». Моноблоки испытывались методом фиксированных частот в следующих поддиапазонах: 10—12,5; 12,5—16; 16—20; 20—25; 25—31,5; 31,5—40; 40—50; 50—63; 63—80; 80—100 Гц с амплитудой перемещения 0,5 мм и амплитудой ускорения 20 м/с². Общая продолжительность испытаний составила 25 ч, по каждому поддиапазону — 2,5 ч. Моноблоки во время испытаний были нагреты постоянным током 9,2 А до температуры (140 ± 5) °С.

Таблица 8.24

Конструкция макетов для испытаний

Номер образца	Межвитковая изоляция	Корпусная изоляция	Пропиточный компаунд
1	Полиимидная пленка Kapton 100H	Пропитанная лента стеклоткань, слюда пленка Kapton 100H	Циклоалифатическая смола
2	Полиимидная пленка Kapton 100H	Kapton 100H склейка со слюдой плюс Kapton 100H	Полиэфиримид 3340
3	Полиимидная пленка Kapton 100H	Kapton 100H склейка со слюдой плюс Kapton 100H	Полиэфиримид 3309
4	Стекловолоконистая изоляция с лавсаном	Kapton 100H склейка со слюдой плюс Kapton 100H	Полиэфиримид 3309
5	Стекловолоконистая изоляция	Стеклоткань склеенная со слюдой плюс Kapton 100H	Полиэфиримид 3309
6	Стекловолоконистая изоляция	Kapton 100H склейка со слюдой плюс Kapton 100H	Полиэфиримид 3309
7	Полиимидная пленка Kapton 100H	Стеклоткань склеенная со слюдой плюс Kapton 100H	Кремнийорганическая смола 3351
8	Полиимидная пленка Kapton 100H	Стеклоткань склеенная со слюдой плюс Kapton 100H	Кремнийорганическая смола 3351
9	Полиимидная пленка Kapton 100H	Стеклоткань склеенная со слюдой плюс Kapton 100H	Кремнийорганическая смола 3351

После испытаний определялось усилие выпрессовки катушки с полюса при температуре $(140 \pm 5)^\circ\text{C}$, которое составило 2000, 2800 и 2700 кг.

Испытания на тепловое старение моноблоков заключались в нагреве до 250°C и выдержке при этой температуре в течение 16 ч. По окончании испытаний моноблоки охлаждались в термостате до температуры 180°C и измерялось сопротивление изоляции, которое составило более 500 МОм.

На другой партии моноблоков после термического старения определялось пробивное напряжение изоляции катушек, которое составило 15,0—15,5 кВ.

Затем было определено усилие распрессовки катушки от полюса при температуре $(140 \pm 5)^\circ\text{C}$, которое составило 1000, 1800 и 1500 кг.

Таким образом, пропитка в компаунде «Элпласт-180ИД» приводит к значительному (до 20 %) снижению перегревов обмотки и увеличению (почти в 8 раз) усилия распрессовки моноблоков в горячем состоянии при температуре $(140 \pm 5)^\circ\text{C}$ по сравнению с моноблоками, пропитанными в лаке КО-916.

В табл. 8.24 приведена конструкция изоляции тяговых электродвигателей фирмы Von Roll Isola, на макетах секций которых (сечение медного порводника 4×10 мм, толщина изоляции 0,35—0,40 мм на сторону) проводились циклические испытания.

Конструкция первого образца — это система изоляции тягового двигателя для высокоскоростных поездов в ФРГ.

Один цикл испытаний состоял из термического старения при температуре 260°C в течение 96 ч, охлаждение, в течение 48 ч при температуре 45°C и 95 %-ной относительной влажности. После каждого цикла проводились

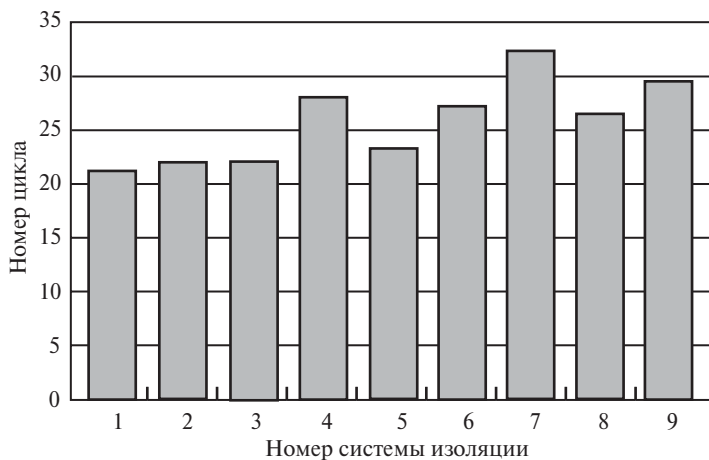


Рис. 8.50. Пробой 50 % катушек при проведении циклических испытаний

Таблица 8.25

Перегревы обмоток в ТЭД с системой электрической изоляции класса нагревостойкости Н (технология, применяемая на Челябинском ЭРЗ)

Номер якоря	Температура якоря, °С	Температура главных полюсов, °С	Температура добавочных полюсов, °С
458	80	109	87
872	84	104	91
548	71	108	91
38	84	108	60
1921	79	108	83
263	83	112	91
511	85	117	94
221	83	107	62

Таблица 8.26

Перегревы обмоток в ТЭД с системой электрической изоляции класса нагревостойкости F (серийный ремонт, производимый на Челябинском ЭРЗ)

Номер якоря	Температура якоря, °С	Температура главных полюсов, °С	Температура дополнительных полюсов, °С
458	118	117	121
658	124	137	124
258	116	118	120
3497	118	117	113
318	121	137	124
366	124	143	131
373	122	118	120
887	117	122	121

электрические испытания: выдержка под напряжением 3,5 кВ частотой 50 Гц в течение 2 мин. Всего испытывалось по 40 катушек каждого варианта. Число циклов регистрировалось после пробоя 50 % катушек. Результаты испытаний приведены на рис. 8.50.

Самые низкие результаты получены на образцах, пропитанных циклоалифатической смолой. Это естественно, так как это система рассчитана для класса нагревостойкости F. Наилучшие характеристики оказались у кремнийорганических смол. Несколько хуже характеристики у полиэфиримидных смол. Это вызвано тем, что выбранная температура термического старения несколько выше 260 °С. Эти составы термостабильны до температуры 240—250 °С.

Кроме высоких электрофизических характеристик технология «Термолит» обеспечивает хорошую теплопередачу и снижение перегревов обмоток тяговых электродвигателей.

Проведенные исследования по перегревам обмоток тяговых электродвигателей ТЛ-2К для магистральных электровозов, изготовленных по технологии «Термолит Н» показали, что по сравнению с серийно изготовленными двигателями класса нагревостойкости F существенно снижаются перегревы обмоток (табл. 8.25 и 8.26). Высокие значения теплопередачи обусловлены также технологическими приемами: пропитка и запекание якоря осуществляются коллектором вниз, тем самым гарантируется полная пропитка компаундом и отсутствие его вытекания из обмотки; бандаж полностью наносится до пропитки, в результате чего обмотка допропитывается и имеет высокие механические характеристики и повышенную теплопроводность.

Такое снижение перегревов обмоток гарантирует, что эксплуатационная надежность двигателей значительно возрастает, а при пересчете параметров двигателя на работу по классу нагревостойкости Н возможно повышение его мощности на 15—20 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глебов И.Л., Данилевич Я.Б.** Научные проблемы турбогенераторостроения. Л.: Наука, 1974.
2. **Видеман Е., Келленбергер В.** Конструкция электрических машин. М.: Энергия, 1972.
3. **Крупные** электрические машины переменного тока / В.М. Бизия, В.Е. Матюков, И.Н. Радин и др. // Труды ЦПКТБ КЭМ. Вып. 1. Л.: Энергия, 1971.
4. **Изоляция «Изотенакс»**, технологическая статья фирмы «Альстон-Атлантик» № 5, июль 1978.
5. **Девей С., Денхам Д.** Новые конструкции изоляции для крупных турбогенераторов. ВЕАМА // Инст. электр. изоляции. Конф. 1974. С. 1—6.
6. **Неал Д.** Развитие высоковольтных изоляционных систем для вращающихся машин // Жур. Научная технология. 1972. Т. 39. № 1.
7. **Неал Д.** Механизированная изолировка пропитанными слюдосодержащими лентами высоковольтных статорных катушек для всех типов вращающихся машин до 30 кВ // 10-я конф. Электрическая изоляция, 1971. С. 13—17.
8. **Ярошения Е.И.** Системы изоляции гидро-турбогенераторов и электродвигателей высокого напряжения за рубежом: аналитический обзор. М.: Информэлектро, 1977.
9. **Антон К.** Аспекты развития катушечных обмоток в США // Конф. IEEE, 1971. С. 303—313.
10. **Антон К.** Дюриваль — третье поколение изоляции класса F для вращающихся машин. ВЕАМА, 1978. С. 25—34.
11. **Мицуи Х., Кумазава Р., Умемото К.** Свойства изоляции «Тостайт I» для статорных катушек крупных вращающихся машин. ВЕАМА. 1979. С. 40—50.
12. **Мицуи Х., Ямомото М., Хурукато С.** Новые системы изоляции «Тостайт II» для высоковольтных индукционных двигателей // Конф. IEEE, 1973, Чикаго. С. 110—114.
13. **Гиайа Н, Мадхун С., Шалтс В.** Второе поколение эпокислюдобумажной системы изоляции статорных обмоток больших турбогенераторов // Конф. IEEE. 1978. Т. 97. № 1. С. 125—133.
14. **Система** изоляции «Майкафолд» // ASEA Journal. 1977. Т. 50. № 4. С. 93.
15. **Хирабаями С., Шибаями К.** Новые системы изоляции высоковольтных вращающихся машин на основе слюдяных бумаг и эпоксидных смол // Мицубиси дэнки Гихо. 1974. Т. 48. № 3. С. 291—296.
16. **Хирабаями С., Хаяси О.** Система диэпоксидной изоляции на основе новой эпоксидной смолы для высоковольтных двигателей переменного тока // Мицубиси дэнки Гихо. 1974. Т. 48. № 3. С. 297—302.
17. **Шулер Р.** Изоляционные системы для высоковольтных вращающихся машин // BBC жур. 1971. № 1. С. 27—29.
19. **Шулер Р.** Применение изоляционной системы «микадур-компакт» // BBC жур. 1972. Т. 59. № 12. С. 577—582.
20. **Шулер Р.** Система изоляции «Микадур-компакт» для высоковольтных вращающихся машин. Опыт изготовления и применения // BBC жур. 1974. № 1. С. 20—23.
21. **Сато И., Джидайя Е.** Изоляция катушек высоковольтных машин, изготовленная без изолировки, об. ВЕАМА, 1978. С. 1—9.
22. **Сушкова И.Т.** Изоляция слюдотерм обмоток высоковольтных генераторов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., ВЭИ, 1968.

23. **Буннер В.Б.** Исследование эксплуатационных свойств изоляции по результатам испытаний натуральных образцов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., ВЭИ, 1969.
24. **Трубачев С.Г.** Разработка и исследование изоляции типа монолит для статорных обмоток гидрогенераторов: Дис. ... канд. техн. наук. М., ВЭИ, 1974.
25. **А.с. 208099 СССР.** Способ изготовления изоляции / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков и др., 1967.
26. **Изоляция** типа монолит-2 для секционных и стержневых обмоток электрических машин / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков и др. // Электротехника. 1969. № 10.
27. **А.с. 725151 СССР.** Способ изготовления изоляции обмоток электрических машин / В.Г. Огоньков, Н.В. Александров, Е.А. Калинина, С.Г. Трубачев и др. 1980.
28. **А.с. 775828 СССР.** Способ изготовления изоляции обмоток электрических машин / В.Г. Огоньков, Н.В. Александров, Е.А. Калинина, С.Г. Трубачев и др. 1980.
29. **А.с. 792504 СССР.** Способ изготовления изоляции обмоток электрических машин / В.Г. Огоньков, Н.В. Александров, Е.А. Калинина, С.Г. Трубачев и др. 1980.
30. **А.с. 744099 СССР.** Препрег. / Г.М. Дулицкая, В.Ф. Зинин, Н.П. Большакова и др. 1980.
31. **А.с. 806714 СССР.** Препрег. / А.М. Белинков, В.В. Рожков, А.И. Лебедев, В.Г. Огоньков и др. 1980.
32. **Александров Н.В., Трубачев С.Г., Ярошня Е.И.** Противокоронная защита термореактивной изоляции обмоток высоковольтных электрических машин // Электротехника. 1972. № 5.
33. **Фромберг М.Б., Белкина Т.М., Ярошня Е.И., Талыков В.А.** Полупроводящие эмали для противокоронной защиты изоляции высоковольтных электрических машин // Электротехника. 1976. № 5.
34. **Композиционные материалы** для крепления лобовых частей статорных обмоток высоковольтных электрических машин / Н.А. Телешева, М.А. Голубенко, Э.И. Хофбауэр, В.Г. Огоньков и др. // Электротехническая промышленность, сер. Электротехнические материалы. 1981., вып. 9 (134). С. 18.
35. **Александров Н.В., Холодовская Р.С., Забарская Л.С.** Электроизоляционные пропиточные составы на основе эпоксидных смол, применяемые зарубежными фирмами. М.: Информ-электро, 1970.
36. **Лосев И.М., Тростянская Е.Б.** Химия синтетических полимеров. М.: Химия, 1964.
37. **Николаев А.Ф.** Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. М.: Химия, 1964.
38. **Энциклопедия полимеров.** Т. 1, 2, 3. М.: Советская энциклопедия, 1974—1977.
39. **Ли Х., Невилл К.** Справочное руководство по эпоксидным смолам. М.: Энергия, 1973.
40. **Пенчек П.** Возрастание вязкости эпоксидной смолы во время отверждения кислотным ангидридом // Polymery. 1967., № 7, С. 328—331.
41. **Е. Sacher.** Кинетика отверждения эпоксидных смол. Системы бисфенол-А — эпоксиды/дици. «Polymery». 1973. Вып. 14. № 3. С. 91—95.
42. **Кен Л., Гийа Р., Урбан Р.** Новые электроизоляционные материалы для вакуум-нагнетательной пропитки класса F // IEEE. 1971. № 10. С. 257—259.
43. **А.с. 262239 СССР.** Способ изготовления обмоток / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков и др. 1969.
44. **Холандс К., Релнин И.** Epoxy Resins. 1979. Т.92. С. 60.
45. **Бартенев Г.М.** Высокомолекулярные соединения. 1964. С. 335.
46. **Эмануэль М.И., Кнорре Д.Г.** Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1962.

47. **Джидай Н.** Математическая модель и оценка срока жизни катализированных эпоксидных систем, применяемых для вакуумнагнетательного процесса // 10-я Конференция по электрической изоляции. 1971. С. 344—351.
48. **Лиска В., Марк С.** // Химия. 1973. № 28 (420). С. 95.
49. А.с. 612938 СССР. Способ получения электроизоляционного материала / Р.С. Холодовская, М.А. Голубенко, Л.Я. Мошинский, В.Г. Огоньков и др. 1978.
50. А.с. 692010 СССР. Способ изготовления катушек обмоток электрических машин / В.Г. Огоньков, С.Г. Трубачев, Н.В. Александров и др. 1979.
51. **Беррер Р.** Диффузия в твердых телах. М., 1948.
52. **Берт Р., Стюарт В., Лайторут Е.** Явления переноса. М.: Химия, 1974.
53. **Wilre C.R., Chang P.** // Chem. Eng. Progr. 1955. № 83. С. 212.
54. **Wilre C.R.** // Chem. Eng. Progr. 1949. № 45. С. 218.
59. **Соболев В.Г., Новгородская Т.И., Огоньков В.Г.** Влияние структуры на свойства утолщенных слюдопластовых бумаг и электроизоляционных материалов на ее основе // ЭП. Сер. Электротехнические материалы. 1978. № 7.
60. **Букин Б.А., Рычкова Р.М., Александров Н.И., Сопотова В.И.** Пропитываемость слюдяных бумаг // ЭП. Сер. Электротехнические материалы. 1979. № 3.
61. **Привезенцев В.А.** Производство силовых кабелей. М.: Госэнергоиздат, 1956.
62. **Изоляция монолит-2 для тягового электромашиностроения** / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков и др. // Электротехника. 1972. № 5.
63. **Термореактивная стеклослюдинитовая изоляция «Монолит-2» для катушечных обмоток высоковольтных электрических машин** / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков и др. // Электрические машины переменного тока (Труды ЦПКТБ КЭМ, вып. 1). Л.: Энергия, 1971. С. 169—179.
64. **Алонштран Ю.Л., Шройт В.Е., Элькинд Ю.М.** Влияние ударно-циклических воздействий на кратковременную электрическую прочность термореактивной изоляции статора генератора // Труды ВНИИЭ. М.: Энергия, 1979. С. 63—59.
65. **Александров Н.В., Трубачев С.Г., Огоньков В.Г.** Критические деформации и жесткость стержней с микалентной компаундированной изоляцией и термореактивной стеклослюдинитовой изоляцией // Электротехника. 1970. № 9.
66. **Влияние термомеханических деформаций на свойства термореактивной изоляции «Монолит-2»** / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, М.Ф. Юдов и др. // Электротехника. 1974. № 12.
67. **Лысенко П.Л., Сяков В.Г., Зуев А.И.** Исследование свойств изоляции «Монолит-2» стартовых обмоток электрических машин // ЭП. Сер. Электротехнические материалы. 1974. Вып. 8.
68. **Огоньков В.Г., Александров Н.В., Трубачев С.Г.** Современные тенденции в области изоляции высоковольтных электрических машин // Ремонт электрооборудования на промышленных предприятиях. Материалы семинара. М., 1976.
69. **Александров Н.В., Трубачев С.Г., Калинина Е.А.** Определение длительности электрической прочности изоляции высоковольтных электрических машин // Электротехника. 1970. № 3.
70. А.с. **599709 СССР.** Способ изготовления обмоток / В.Г. Огоньков, С.Г. Трубачев, Н.В. Александров и др. 1977.
71. **Александров Н.В., Трубачев С.Г., Огоньков В.Г.** Термореактивная стеклослюдинитовая изоляция монолит и монолит-2 для генераторов и высоковольтных электрических машин // Лекции по вопросам надежности и ремонта электрооборудования. М.: Общество «Знание» РСФСР. 1973.

72. **Александров Н.В., Огоньков В.Г., Трубачев С.Г.** Электроизоляционные материалы и системы изоляции высоковольтных электродвигателей и генераторов. ВЭЛК, доклад ЗА-Зс, М., 1977.
73. **А.с. 710092 СССР.** Способ изготовления статоров электрических машин / В.Г. Огоньков, Н.В. Александров, С.Г. Трубачев и др. 1980.
74. **Повышение** нагревостойкости изоляции электрических машин высокого напряжения / Л.С. Забарская, С.Б. Шагалов, В.Г. Огоньков и др. // ЭП. Сер. Электротехнические материалы. Вып.10. 1979.
75. **А.с. 474078 СССР.** Способ изготовления изоляции обмоток электрических машин / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков и др. 1978.
76. **А.с. СССР.** Электроизоляционная лента и способ ее изготовления / Л.З. Аснович, В.Б. Березин, А.И. Петрашко и др.
77. **Шагалов С.Б., Скипетров В.В., Огоньков В.Г.** Современные тенденции в области изоляции низковольтных электрических машин массовых серий и электрических машин с тяжелыми условиями эксплуатации // Материалы семинара. Ремонт электрооборудования на промышленных предприятиях. М., 1976.
78. **А.с. 319960 СССР.** Способ изготовления обмоток электрических машин / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков, В.А. Силантьев, Ю.В. Сорокин и др. 1971.
79. **А.с. 365007 СССР.** Способ изготовления обмотки электрической машины / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков и др. 1972.
80. **Исследование** изоляции монолит электродвигателей угольных комбайнов / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.П. Хархота, В.Г. Кирикиас и др. // Электротехника. 1974. № 9.
81. **Разработка** и исследование изоляции монолит повышенной нагревостойкости / Л.С. Забарская, Б.П. Зернов, В.Г. Кирикиас, В.Г. Огоньков и др. // Международная конференция «Исследование и разработка асинхронных двигателей. Владимир, 1978.
82. **А.с. 748680 СССР.** Способ изготовления изоляции обмотки электрических машин / В.Г. Огоньков, С.Г. Трубачев, С.Б. Шагалов и др. 1978.
83. **Стойкость** изоляции монолит к термомеханическим напряжениям в шахтных взрывобезопасных трансформаторах. / Н.В. Александров, С.Г. Трубачев, В.Г. Кирикиас, В.П. Хархота и др. // Электротехника. 1974. № 9.
84. **А.с. 671005 СССР.** Способ ремонта обмоток / В.Г. Огоньков, С.Г. Трубачев, Н.В. Александров. 1979.
85. **Ярошеня Е.И., Огоньков В.Г., Трубачев С.Г.** Восстановленная изоляция «Монолит-5» для статорных обмоток гидрогенераторов // Электротехника. 1979. № 6.
86. **Применение** новых электроизоляционных материалов — решающий фактор в повышении энергоресурсов электрических машин и снижение их веса / А.И. Петрашко, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков, С.Б. Шагалов // Электротехника. 1979. № 6.
87. **Пути** повышения электрической прочности и долговечности изоляции «Монолит-2» крупных электрических машин / В.П. Вдовико, В.Г. Сяков, К.И. Масленников, В.Г. Огоньков // Электротехника. 1982. № 1.
88. **Циклические** испытания изоляции «Монолит-2» обмоток крупных электрических машин. / П.Л. Лысенко, В.Г. Сяков, И.А. Самойлова, В.Н. Мелешенко // ЭП. Технология электротехнического производства. 1983. Вып. 10 (173).
89. **А.с. 807454 СССР.**Способ ремонта обмоток / Е.И. Ярошеня, В.Г. Огоньков, С.Г. Трубачев и др. 1979. № ???.
90. **А.с. 807455 СССР.** Способ ремонта обмоток / Е.И. Ярошеня, С.Г. Трубачев, В.Г. Огоньков и др. 1979.

91. **А.с. 775828 СССР.** Способ изготовления изоляции обмоток электрических машин / В.Г. Огоньков, И.В. Александров, Е.А. Калинина, С.Г. Трубачев и др. 1978.
92. **А.с. 1045803 СССР.** Обмотка электрической машины / В.Г. Огоньков, О.Б. Демина, Т.А. Гуреева, И.В. Александров и др. 1980.
93. **А.с. 889669 СССР.** Способ деполимеризации отвержденной эпоксидной смолы / А.Г. Гроздов, В.А. Маслов, А.А. Рахманов, В.И. Зайцев, В.Г. Огоньков и др. 1980.
94. **А.с. 870409 СССР.** Способ деполимеризации отвержденной эпоксидной смолы / А.Г. Гроздов, О.А. Сидорова, В.Г. Огоньков, В.Г. Сяков. 1979.
95. **А.с. 889670 СССР.** Способ деполимеризации отвержденной эпоксидной смолы / А.Г. Гроздов, Л.А. Рахманов, В.А. Маслов, В.Г. Огоньков и др., 1980.
96. **А.с. 1382350 СССР.** Способ изготовления изоляции обмотки статора / В.Г. Огоньков, И.С. Окнин, В.В. Метров, Ж.П. Погодина. 1984.
97. **Огоньков В.Г.** Разработка, исследование изоляции «Монолит-2» для статорных обмоток высоковольтных электрических машин и генераторов: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1981.
98. **Отработка** изготовления технологии изготовления обмоток статоров высоковольтных двигателей с изоляцией «Монолит-2» / А.И. Зуев, П.Л. Лысенко, В.Г. Сяков, И.А. Чжен // Технология электротехнического производства. 1974. Вып. 6/61.
99. **Кабанов С.М., Лысенко П.Л., Сяков В.Г.** Изоляция конструкции статорных обмоток высоковольтных двигателей с изоляцией «Монолит-2» // ЭП. Электротехнические материалы. 1973. Вып. 7(36).
100. **Лысенко П.Л., Сяков В.Г.** Выбор напряжений для испытаний изоляции «Монолит-2» статорных обмоток крупных электрических машин до пропитки // Электрические материалы. 1973. Вып. 1(39).
101. **Лысенко П.Л., Сяков В.Г., Зуев А.Н.** Исследование свойств изоляции «Монолит-2» статорных обмоток электрических машин // Электрические материалы. 1974. Вып.8(49).
102. **Рязанов В.Г., Туллер М.А., Сяков В.Г.** Испытания мощного асинхронного двигателя с терморезистивной изоляцией. Томск: Известия ТПИ, 1971. Т. 212.
103. **Склеивание** крайних пакетов сердечников статоров электрических машин лаком ПЭ933 / В.А. Девочкина, П.Л. Лысенко, В.Г. Сяков и др. // Технология электротехнического производства. 1977. Вып.7(98).
104. **Исследование** долговечности изоляции Монолит-2 обмоток статоров высоковольтных взрывонепроницаемых двигателей в условиях угольных шахт / Л.А. Збарский, И.Г. Ширнин, П.Л. Лысенко, В.Г. Сяков // Электрические материалы. 1975. Вып.2(48).
105. **Вопросы** повышения электрической прочности изоляции «Монолит-2» / В.П. Вдовико, Л.И. Филипова, В.Г. Сяков, В.Г. Огоньков. М.: Союзтехэнерго, 1979.
106. **Лысенко П.Л., Сяков В.Г.** Исследование изоляции «Монолит-2» статорных обмоток крупных электрических машин на работоспособность. Л.: НТО Э и ЭТП, 1975.
107. **Результаты** испытаний изоляции «Монолит-2» статорной обмотки двигателя АТД2 — 5000 кВт после эксплуатации у заказчика; анализ эксплуатации асинхронных двигателей с изоляцией «Монолит-2» / К.Ф. Потехин, В.Г. Сяков, П.Л. Лысенко и др. М.: Союзтехэнерго, 1979.
108. **Испытание** на работоспособность статорной обмотки с утонченной изоляцией «Монолит 2У» / К.Н. Масленников, К.Ф. Потехин, В.Г. Рязанови др. М.: Союзтехэнерго, 1979.
109. **Пути** повышения электрической прочности и долговечности изоляции «Монолит-2» крупных электрических машин / В.П. Вдовико, В.Г. Сяков, К.Н. Масленников, В.Т. Огоньков // Электротехника. 1982. № 1.

110. **Циклические** испытания изоляции «Монолит-2» статорных обмоток крупных электрических машин / П.Л. Лысенко, В.Г. Сяков, Н.А. Самойлова и др. // ЭП. Технология электротехнического производства. 1983. Вып. 10(173).
111. **Разработка** метода оценки работоспособности изоляции высоковольтных электродвигателей / Г.А. Данилов, В.Г. Огоньков, В.Г. Сяков, Н.С. Окнин. Л.: НТО Э и ЭТП, 1983.
112. **Бернштейн Л.М.** Совместимость изоляционных материалов в конструкциях изоляции. // Труды Московского института радиоэлектроники и автоматики. 1974. Вып.74. С. 77—80.
113. **Пешков И.Б.** Обмоточные провода. М.: Энергоатомиздат, 1983.
114. **Кулаковский В.Б.** Методы испытаний витковой изоляции статорных обмоток электрических машин // Испытания витковой изоляции / под ред. Л.Г. Мамиконянца. М.: Госэнергоиздат, 1959. С.36.
115. **Балдин Е.П.** Исследование электрической прочности витковой изоляции высоковольтных электрических машин // Сборник научных трудов Ивановского энергетического института. 1958. Вып. VIII.
116. **Ященко С.А.** Пути повышения уровня электрических и тепловых характеристик витковой изоляции при ремонте тяговых электродвигателей // Кабели и провода. 2008. № 5. С. 26—27.
117. **Современные** компаунды для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов / С.А. Ященко, Ю.М. Евтушенко, В.В. Иванов и др. // Тез. докл. IV Международной научно-технической конф. «Электрическая изоляция — 2006» (Санкт-Петербург, май 2006.). СПбГТУ. 2006. С. 116—117.
118. **Ященко С.А.** Исследование влияния пропитки на качество витковой изоляции при ремонте ТЭД // Тр. XI Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Крым. Алушта. 2006. Ч.1. С. 63—65.
119. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979.
120. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
121. **Миснар А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир, 1968.
122. **Теоретические** основы теплотехники. Теплотехнические эксперимент: Справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. — 2-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1988.
123. **Чечеткин А.В., Занемонец Н.А.** Теплотехника: учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1986.
124. **Ященко С.А.** Исследование теплопроводности электроизоляционных материалов и корпусной изоляции класса нагревостойкости Н для тяговых электродвигателей // Тр. XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Крым. Алушта, 2008. С. 45—46.
125. **Пропиточные** составы для систем изоляции класса нагревостойкости В, F, H, C / Ю.М. Евтушенко, В.В. Иванов, К.С. Сидоренко и др. // Тр. V Междунар. симпозиума ЭЛМАШ- 2004 «Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования». Москва, 2004. Т. II. С.46—52.
126. **Иоффе А.В.** Тяговые электрические машины. М.— Л.: Энергия, 1965.
127. **Мантров М.И.** О контроле качества изоляции машин // Вестник электропромышленности. 1935. № 8.
128. **Козырев Н.А.** Изоляция электрических машин и методы ее испытания. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1962.

129. **Высоконадежная** и высокоэффективная система изоляции «Монолит-4» статорных обмоток асинхронных двигателей / В.Г. Сяков, Г.А. Данилов, В.Г. Огоньков, И.С. Окнин // *Электротехника*. 1992. № 3.
130. **Головач Ю.И., Кубил В.О., Щербаков В.Г.** Исследование теплопроводности изоляции катушек тяговых электродвигателей электровозов // *Электровозостроение* : Сб. науч. тр. Новочеркасск, 2002. Т. 44.
131. **Березинец Н.И., Украинский Ю.М., Захаров В.И.** Методология и некоторые результаты исследований отечественной системы изоляции для тяговых электродвигателей ИТА-1200 // «Электровозостроение» : сб. науч. тр. Новочеркасск. 2002. Т.44.
132. **Новое** поколение пропиточных компаундов / К.С. Сидоренко, Ю.М. Евтушенко, А.П. Биржин, В.К. Комарова // *Электротехника*. 2002. № 4.
133. **Куимов И.Е., Папков А.В., Пак В.М.** Перспективы создания и внедрения новых электроизоляционных материалов // VI симпозиум «Электротехника». 2010. ТЗ. 6.02.
134. **Основные** результаты тестирования системы изоляции класса нагревостойкости Н (180 °С) на основе материалов ОАО ХК Элинар / Т.И. Карпушина, А.М. Андреев // *Электротехника*. 2009. № 3.
135. **Метод** испытаний высоковольтными импульсами межвитковой изоляции и его применение при автоматизированном производстве обмоток электротехнических машин / В.М. Пак, А.В. Папков, А.П. Мельниченко и др. // *Электротехника*. 2009. № 3.
136. **Ярошения Е.И., Трубачев С.Г., Огоньков В.Г.** Восстановленная изоляция «Монолит-5» для статорных обмоток гидрогенераторов // *Электротехника*. 1979. № 6.
137. **Ященко С.А.** Модернизация и исследования системы электрической изоляции класса нагревостойкости Н тяговых электродвигателей, эксплуатируемых в экстремальных условиях: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2009.
138. **Мельник Т.М., Биржин А.П., Огоньков В.Г.** Новое поколение электроизоляционных материалов — повышение надежности тяговых двигателей // Тр. LXVI Междун. науч.-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». Днепропетровск, 2006.
139. **Биржин А.П., Огоньков В.Г., Мельник Т.М.** Новое поколение электроизоляционных материалов — основа надежности тяговых двигателей // Тр. IV Междун. науч.-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». Сер. Техника, технология. Киев, 2008.
140. **Новые** электроизоляционные материалы ЗАО «Электроизолит» при изготовлении и ремонте электрических машин / А.П. Биржин, С.А. Ященко, В.В. Иванов, Ю.М. Евтушенко // Тр. VI Междунар. симпозиума «Элмаш-2006». М., 2006, Т. 2. С. 195—201.
141. **Современные** компаунды для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов / С.А. Ященко, Ю.М. Евтушенко, В.В. Иванов, К.С. Сидоренко // Тезисы докладов IV Междунар. науч.-техн. конференции «Электрическая изоляция-2006». Санкт-Петербург. 16—19 мая 2006. С. 116—117.
142. **Brütsch R.** Von Roll Isola Insulating Systems for Traction Motors // V Междунар. симпозиум «Элмаш-2004». Тр. симпозиума. Т. II. Москва. 2004.
143. **Пат. № 2333586 2007 РФ.** Способ изготовления корпусной изоляции обмоток высоковольтных электрических машин / Н.В. Сяков, В.М. Сухар, В.Г. Огоньков, В.Г. Сяков.
144. **Пат. № 2362227 2008 РФ.** Способ вакуум-нагнетательной пропитки и запечки изоляции высоковольтных вводов / В.Г. Сяков, В.М. Сухар, Г.А. Данилов, В.Г. Огоньков.
145. **Пат. № 2357312 2008 РФ.** Способ изготовления пропитанных лент для изоляции электрических машин / В.И. Лебедев, А.П. Биржин, В.Г. Огоньков.

146. Пат. № 2366060 2008. Способ изготовления изоляции обмоток электрических машин / В.В. Иванов, В.Г. Огоньков, К.С. Сидоренко, С.А. Яценко.
147. Пат. № 89934 2010 Украины. Электроизоляционный стеклослюдинитовый материал / Т.М. Мельник, В.М. Капируля, Е.М. Евтушенко и др.
148. Пат. № 89814 2010 Украины. Спосіб виготовлення багатошарової ізоляції обмоток електричних машин / А.П. Биржин, В.М. Капируля, Т.М. Мельник, В.Г. Огоньков.
149. Евтушенко Ю.М., Огоньков В.Г., Сидоренко К.С., Яценко С.А. Полиэфиримидные компаунды — основа систем изоляции современных тяговых электродвигателей // Электротехника. 2011. № 3.
150. Системы электрической изоляции электрических машин Термолит / Ю.М. Евтушенко, В.Г. Огоньков, К.С. Сидоренко, С.А. Яценко // Электротехника. 2010. № 12.

Научное издание

**Огоньков Вячеслав Григорьевич,
Серебрянников Сергей Владимирович,
Сяков Валентин Григорьевич,
Ященко Сергей Александрович**

**ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
И СИСТЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

В двух книгах

Книга 2

Редактор *Н.Л. Пароева*
Художественный редактор *А.Ю. Землеруб*
Технический редактор *Т.А. Дворецкова*
Корректоры *Р.М. Ваничкина, В.В. Сомова*
Компьютерная верстка *В.В. Пак*

Подписано в печать с оригинала-макета 25.06.12 Формат 70×100/16
Бумага офсетная Гарнитура Таймс Печать офсетная
Усл. печ. л. 24,5 Усл. кр.-отт. 25,5 Уч.-изд.л. 22,8
Тираж 500 экз. Заказ

ЗАО «Издательский дом МЭИ», 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14,
тел/факс: (495) 361-1681, адрес в Интернет: <http://www.mpei-publishers.ru>,
электронная почта: info@idmei.ru

Отпечатано в типографии ПЦ МЭИ, 111116, Москва, Красноказарменная, д. 13, стр. 4